

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP
PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus Untuk $(L/D) = 1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Bilangan Reynolds = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 ”

CITRO ARIYANTO
NRP 2113 100 158

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus Untuk $(L/D) = 1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Bilangan
Reynolds = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 ”

CITRO ARIYANTO
NRP. 2113100158

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
OBSTACLE PLATE ANGLE IN FRONT OF RETURNING
BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE
PERFORMANCE**

“Case Study for $(L/D)=1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Reynolds Number
 $= 3 \times 10^4$, 6×10^4 , and 9×10^4 ”

CITRO ARIYANTO
NRP. 2113100158

Advisory Lecturer:
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

BACHELOR PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN *SAVONIUS***

“Studi Kasus untuk $(L/D) = 1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Bilangan
Reynolds = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

CITRO ARIYANTO

NRP. 2113 100 158

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Triyogi Yuwono, DEA
(NIP. 196001291987011001) (Pembimbing)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD
(NIP. 196412281990031002) (Penguji I)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT
(NIP. 197104051997021001) (Penguji II)
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto
(NIP. 196202161995121001) (Penguji III))

**SURABAYA
JULI, 2017**

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus Untuk $(L/D) = 1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Bilangan
Reynolds = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 ”

Nama Mahasiswa : Citro Ariyanto
NRP : 2113 100 158
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstrak

Ketersediaan bahan bakar fosil untuk penggunaan energi sudah mulai menipis sehingga dibutuhkan energi alternatif. Dengan melihat potensi angin di Indonesia, turbin angin tipe Savonius paling sesuai digunakan sebagai energi terbarukan. Turbin angin Savonius mempunyai dua sudu yaitu advancing blade dan returning blade. Pada prinsipnya, turbin angin Savonius bergerak akibat perbedaan gaya drag yang ditimbulkan antara advancing blade dan returning blade. Salah satu cara untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan memberikan plat datar pengganggu di depan returning blade.

Untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius yang memiliki diameter sudu (D) 101,6 mm dan tinggi (H) 300 mm, sebuah plat dengan lebar (L) 105,2 mm dan tebal (t) 3 mm digunakan sebagai sebuah pengganggu yang diletakkan di depan returning blade. Pengganggu ini diposisikan dengan variasi sudut $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Eksperimen ini dilakukan pada ruangan tertutup dengan menggunakan fan sebagai sumber angin. Eksperimen ini menggunakan bilangan Reynolds (Re) = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 dengan berdasarkan pada panjang karakteristik $d = 2D-b$ (dimana b adalah lebar overlap antara kedua sudu) dan kecepatan aliran udara. Pengaturan kecepatan aliran udara menggunakan voltage regulator untuk mengatur kecepatan putar fan. Kecepatan

aliran udara diukur dengan menggunakan anemometer. Kecepatan putar dari turbin diukur dengan tachometer. Torsi statis diukur menggunakan torquemeter, dan torsi dinamis diukur dengan brake dynamometer. Dengan mengetahui torsi dinamis dan kecepatan putar maka didapatkan daya turbin.

Hasil pada eksperimen ini menunjukkan bahwa pemberian plat pengganggu dapat meningkatkan kinerja turbin. Hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan Coefficient of Power (CoP) turbin Savonius yang dibandingkan dengan turbin tanpa plat pengganggu. Performa turbin Savonius optimal didapatkan ketika sudut plat pengganggu sebesar (θ) 15° . CoP tertinggi sebesar 7,19% pada Re sebesar 6×10^4 . Sementara itu, putaran tertinggi sebesar 823,5 rpm dan torsi statis tertinggi sebesar 9,29 N.cm pada $Re = 9 \times 10^4$. Terjadi peningkatan tertinggi performa turbin Savonius dengan pemberian plat pengganggu pada bilangan Reynolds 6×10^4 , putaran turbin mencapai 1,43 kali lebih besar dan Coefficient of Power mencapai 1,47 kali lebih besar dibandingkan turbin Savonius tanpa pemberian plat pengganggu. Sedangkan untuk torsi statis turbin mencapai 2,85 kali lebih besar dibandingkan dengan torsi statis turbin Savonius tanpa plat pengganggu pada $Re = 9 \times 10^4$.

Kata kunci : Performa turbin Savonius, plat pengganggu, variasi sudut plat pengganggu

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF OBSTACLE PLATE ANGLE IN FRONT OF RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE

“Case Study for $(L/D)=1,035$; $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; Reynolds Number
 $= 3 \times 10^4$, 6×10^4 , and 9×10^4 ”

Name : Citro Ariyanto
NRP : 2113 100 158
Department : Mechanical Engineering FTI – ITS
Advisory Lecturer : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstract

Availability of fossil fuels as energy source in the world is decreasing significantly and continuously, so it is needed to explore an alternative energy, especially not fossil energy source. Savonius turbine is one of several types of wind turbine which ideal for regions. Savonius turbine has two blade such as advancing blade and returning blade. In principle, Savonius turbine works caused by the difference of the drag force generated by its blades, advancing and returning blades. One of the method to increase the performance of Savonius turbine is by placing an obstacle plate in front of the returning blade.

In order to increasing the performance of Savonius wind turbine having a diameter D of 101,6 mm and height H of 300 mm, a plate having a width L of 105,19 mm and a thick of t 3 mm is used as an obstacle located in front of returning blade of turbine. This obstacle is located in various angle of $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. The experiments were carried out on a close room and an axial fan is used as source of wind. The free stream velocity of wind has Reynolds number of $(Re) = 3.0 \times 10^4$, 6.0×10^4 , 9.0×10^4 based on equivalent length of $d = 2D - b$ (where b is the width of overlap between the two turbine blades) and the free stream velocity. The free stream velocity of wind is measured by anemometer. The rotation of turbine is measured by tachometer. The static torque is

measured by torquemeter, and dynamic torque is measured by brake dynamometer.

The results of this experiment showed that placing the obstacle plate in front of the returning blade can improve the performance of Savonius wind turbine. It is based on the rise in rotation (n), static torque (T), and Coefficient of Power (CoP), compared with the Savonius wind turbine without any obstacle. The best performance of the Savonius turbine is obtained when the opening angle of the obstacle plate (θ) = 15° . The highest of COP is 7.19% for $Re = 6 \times 10^4$. Meanwhile, the highest rotation of turbine is 823.5 rpm and the static torque is 9.29 N.cm for $Re = 9 \times 10^4$. The highest improvement of the performance of the Savonius turbine was occurred for $Re = 6 \times 10^4$ due to the placing of flat plate in front of the returning blade. In this case, the rotation of turbine 1.43% and Coefficient of Power 1.47% larger than the Savonius turbine without any obstacle plate. The static torque of the turbine 2.85% larger than the static torque Savonius turbine without any obstacle plat for $Re = 9 \times 10^4$.

Keyword: Savonius turbine performance, obstacle plate, various angle

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu WaTa'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orangtua penulis, Ibu **Nur Hayati** dan Bapak **Nasib Nasir** yang senantiasa mendoakan, membimbing dan memberikan semua hal terbaik untuk penulis. Terimakasih karena telah menjadi seorang ibu dan bapak terbaik bagi penulis.
2. **Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA** yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., dan Dr. Ir. Heru Mirmanto** selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis untuk Tugas Akhir ini.
4. Seluruh punggawa **Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) FTI ITS** yang telah memberikan cerita, pengalaman hidup, dan keorganisasian yang penuh suka dan duka selama ini.
5. Seluruh kerabat **“Tugas Akhir Triyogi Yuwono (TA TRIYOGI’ERS)”** yang telah membantu saya untuk *survive* dalam penyelesaian Tugas Akhir.

6. **Uyab, Inot, Uwik, Intan, Alham, Bokir, Adul, Ubed, Annas** dan semua keluarga **Bengkeler'z 2013 (BEGALS)** yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, yang telah memberikan cerita, pengalaman hidup, dan keorganisasian yang penuh suka dan duka selama ini.
7. Teruntuk **Mutiara** yaitu seorang wanita luar biasa yang telah hadir dan memberikan warna indah yang berbeda di sela lika-liku kisah akhir perkuliahan yang begitu singkat dan meskipun realita tak seindah dengan mimpi.
8. Untuk teman teman ku **Amalia, Rini, Putri, Nana, dan semua teman-teman angkatan 2013** yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terimakasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.
9. **Teman-teman di Lab. MBP**, yang telah menemani mengerjakan tugas akhir dalam 1 semester terakhir.
10. Segenap **dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS**, terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
11. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xv
SIMBOL YANG DIGUNAKAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	7
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Kecepatan Angin di Indonesia	9
2.2 Turbin Angin	11
2.2.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i>	11
2.2.2 <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i>	12
2.3 Turbin Angin Savonius	13
2.4 Gaya <i>Drag</i>	15
2.5 Perhitungan Torsi Statis	17
2.6 Bilangan Reynolds	17
2.7 Perhitungan Daya	18
2.7.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis	18
2.7.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin	19
2.7.3 <i>Coefficient of Power</i>	21
2.7.4 <i>Tip Speed Ratio</i>	21
2.8. Penelitian Terdahulu	23
2.8.1 Studi Eksperimen Turbin Angin Savonius Berpengganggu	23

2.8.2	Simulasi Pengoptimalisasian Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu di Sisi <i>Returning Blade</i>	26
2.8.3	Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu Plat Datar.....	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		35
3.1	Parameter yang Diukur	35
3.2	Analisa Dimensi.....	36
3.2.1	Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	36
3.3	Metode Eksperimen.....	40
3.3.1	<i>Fan</i> dan <i>Volatage Regulator</i>	40
3.3.2	<i>Honeycomb</i>	41
3.3.3	Benda Uji	42
3.3.4	Pelumas	43
3.3.5	Penyangga Turbin Angin Savonius	43
3.3.6	Alat Ukur.....	44
3.4	Prosedur Penelitian.....	51
3.5	<i>Flowchart</i> Penelitian	53
3.6	Prosedur Simulasi	55
3.6.1	Tahap <i>Pre Processing</i>	55
3.6.2	Tahap <i>Processing</i>	56
3.6.3	Tahap <i>Post Processing</i>	56
3.7	Urutan Langkah Penelitian.....	57
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		58
4.1	Contoh Perhitungan.....	59
4.1.1	Perhitungan Bilangan Reynolds.....	59
4.1.2	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	61
4.1.3	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	62
4.1.4	Perhitungan <i>Error</i> Eksperimen (ϵ).....	63
4.2	Analisis Performa Turbin Savonius Tanpa Plat Datar Pengganggu dengan Bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4	65
4.2.1	Putaran Turbin Savonius (n_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re).....	65

4.2.2	Torsi Statis (T_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)	66
4.2.3	<i>Coefficient of Power</i> (CoP_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)	68
4.3	Analisis Performa Turbin Savonius yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ pada Bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4	70
4.3.1	Putaran Turbin Savonius (n) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)	70
4.3.2	Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)	78
4.3.3	Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Bukaannya Sudut Turbin (α)	83
4.3.4	<i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)	84
4.3.5	<i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	91
BAB V PENUTUP.....		95
5.1	Kesimpulan.....	95
5.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN		99
BIODATA PENULIS		

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Salah satu contoh turbin angin horisontal (Turbinesinfo, 2017)	12
Gambar 2.2	Jenis turbin angin sumbu vertikal (Margrét Ósk Óskarsdóttir, 2014).....	13
Gambar 2.3	Arah aliran angin turbin Savonius (David Spera, 2008)	14
Gambar 2.4	Sudu turbin angin Savonius (David Spera, 2008) .	15
Gambar 2.5	Grafik nilai <i>coefficient of power</i> sebagai fungsi <i>tip speed ratio</i> untuk berbagai turbin angin (Al- Shemmeri, 2010)	22
Gambar 2.6	Skema turbin angin Savonius berpengganggu (Altan et al, 2008).....	23
Gambar 2.7	Grafik pengaruh penambahan plat pengganggu terhadap nilai <i>coefficient of power</i> (Altan et al, 2008)	24
Gambar 2.8	Grafik pengaruh putaran turbin terhadap sudut plat pengganggu 1 (Altan et al, 2008)	25
Gambar 2.9	Grafik pengaruh torsi yang dihasilkan terhadap putaran turbin (Altan et al, 2008)	26
Gambar 2.10	Skema alat penelitian pada turbin angin tipe Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)	27
Gambar 2.11	Grafik hubungan antara <i>speed ratio</i> dan <i>power coefficient</i> (CoP) pada turbin angin Savonius dengan dua sudu (Mohamed et al, 2010).....	27
Gambar 2.12	Grafik hubungan antara <i>speed ratio</i> dan <i>power coefficient</i> (CoP) pada turbin angin Savonius dengan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)	28
Gambar 2.13	Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin Savonius dengan diberi pengganggu berupa plat datar dengan sudut tertentu (Mohamed et al, 2010)	28

Gambar 2.14 Grafik pengaruh <i>speed ratio</i> terhadap (a) <i>torque coefficient</i> dan (b) <i>power coefficient</i> (Mohamed et al, 2010)	29
Gambar 2.15 Posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90° (Audiyatra, 2016)	30
Gambar 2.16 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audiyatra, 2016)	31
Gambar 2.17 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audiyatra, 2016)	32
Gambar 2.18 Grafik perbandingan <i>coefficient of power</i> turbin Savonius (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audiyatra, 2016)	33
Gambar 3.1 Skema benda uji.....	35
Gambar 3.2 Skema penelitian.....	36
Gambar 3.3 <i>Fan Portbale</i> CKE-SPV 18	40
Gambar 3.4 Skema <i>honeycomb</i>	41
Gambar 3.5 Skema turbin angin Savonius.....	42
Gambar 3.6 Skema plat datar pengganggu	43
Gambar 3.7 Pelumas Rexco-50	43
Gambar 3.8 Skema penyangga turbin angin Savonius.....	44
Gambar 3.9 Tachometer OMEGA seri HHT12	44
Gambar 3.10 Anemometer OMEGA seri HHF141A.....	45
Gambar 3.11 Torsimeter digital merek LUTRON model TQ-8800.....	46
Gambar 3.12 Susunan sistem <i>brake dynamometer</i>	47
Gambar 3.13 Timbangan pegas	49
Gambar 3.14 Massa Pemberat	49
Gambar 3.15 Timbangan Shimadzu ELB300	50
Gambar 3.16 SANWA PC7000 Digital Multimeter	50
Gambar 3.17 <i>Flowchart</i> pengambilan data.....	54
Gambar 3.18 Dimensi turbin Savonius.....	55
Gambar 3.19 <i>Boundary condition</i> turbin angin Savonius	56
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin Savonius (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re).....	66

Gambar 4.2 Grafik torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	67
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re).....	68
Gambar 4.4 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	69
Gambar 4.5 Grafik putaran turbin Savonius (n) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ).....	71
Gambar 4.6 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)	73
Gambar 4.7 Vektor kecepatan hasil simulasi turbin angin Savonius (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 0^\circ$ (c) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 15^\circ$	76
Gambar 4.8 Kontur tekanan hasil simulasi turbin angin Savonius (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 0^\circ$ (c) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 15^\circ$	78
Gambar 4.9 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)	79
Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ).....	81
Gambar 4.11 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin (α).....	84
Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ).....	85
Gambar 4.13 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	88
Gambar 4.14 Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)	89
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> sebagai fungsi sudut plat pengganggu.....	90

Gambar 4.16 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada $Re = 6 \times 10^4$ 92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Potensi angin beberapa wilayah di Indonesia (Soeripno et al, 2013)	10
Tabel 2.2 Nilai <i>coefficient of drag</i> pada beberapa bentuk benda (Pritchard et al, 2011)	16
Tabel 2.3 Variasi panjang dari plat penganggu dan pengarah (Altan et al, 2008)	24
Tabel 3.1 Dimensi primer parameter	37
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>fan</i> CKE SPV-18.....	41
Tabel 3.3 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12	45
Tabel 3.4 Spesifikasi Omega HHF141A digital anemometer	46
Tabel 3.5 Spesifikasi Torsimeter LUTRON model TQ-8800	47
Tabel 3.6 Spesifikasi timbangan pegas.....	48
Tabel 3.7 Spesifikasi benang nilon Danyl	48
Tabel 3.8 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300.....	49
Tabel 3.9 Spesifikasi Multimeter Digital SANWA PC7000.....	51
Tabel 3.10 <i>Table planner</i> penelitian.....	57

SIMBOL YANG DIGUNAKAN

D	diameter sudu turbin angin Savonius (mm)
L	lebar plat pengganggu (mm)
H	tinggi turbin angin Savonius (mm)
b	<i>overlap diameter</i> (mm)
θ	sudut plat pengganggu (<i>derajat</i>)
S	lebar proyeksi plat pengganggu (mm)
t	lebar plat pengganggu (mm)
Re	bilangan Reynolds
ρ	massa jenis udara (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (Ns/m^2)
U	kecepatan aliran udara (m/s)
A	luas penampang turbin (m^2)
W	usaha (<i>Joule</i>)
F	gaya (<i>Newton</i>)
s	perpindahan (m)
P_w	daya kinetis angin (<i>Watt</i>)
P_t	daya mekanis turbin (<i>Watt</i>)
E_k	energi kinetis (<i>Joule</i>)
t	waktu (s)
\dot{m}	<i>mass flow rate</i> (kg/s)
T	torsi (Nm)
n	kecepatan putar (<i>rpm</i>)
CoP	<i>coefficient of power</i>
TSR	<i>tip speed ratio</i>
v	kecepatan tangensial (m/s)
ω	kecepatan sudut (rad/s)
R	jari-jari (m)
g	percepatan gravitasi (m/s^2)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin bertambahnya jumlah penduduk menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi. Kebutuhan energi ini didapatkan dari sumber utama yaitu bahan bakar fosil. Pemanfaatan bahan bakar fosil ini menimbulkan kekhawatiran akan terjadinya krisis energi yang disebabkan menipisnya bahan bakar fosil yang terkandung di alam serta efek negatif yang ditimbulkan akibat penggunaan bahan bakar fosil berupa pencemaran udara dan pemanasan global. Menurut Menteri Energi dan Sumber Daya (ESDM) Purnomo Yusgiantoro, penelitian di tahun 2005 menyatakan bahwa cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2005 diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 23 tahun dengan rasio cadangan dibanding produksi pada tahun tersebut (**KESDM, 2005**). Oleh sebab itu, saat ini berbagai negara di dunia berlomba membuat sumber energi alternatif untuk mengatasi krisis energi. Salah satunya adalah energi angin yang telah dikembangkan di berbagai negara.

Salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat di dunia saat ini adalah energi angin. Angin merupakan gerakan udara dari daerah yang memiliki tekanan udara lebih tinggi ke daerah dengan tekanan udara yang lebih rendah. Angin memiliki energi kinetik karena gerakan dari angin. Energi angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (**Daryanto, 2007**). Salah satu turbin angin yang dapat digunakan untuk menransmisikan energi angin pada generator listrik adalah turbin Savonius.

Turbin Savonius merupakan turbin jenis *VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)*, rotor angin dengan sumbu tegak yang

dikembangkan oleh *engineer* asal Finlandia, Singuard Savonius pada tahun 1922. Turbin Savonius konvensional yang paling sederhana dibuat menggunakan plat silinder yang dibelah dua pada bagian tengah dan disatukan sehingga membuat penampang huruf S. Pada turbin Savonius terdapat dua jenis *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Pada saat turbin Savonius konvensional bekerja, dorongan dari angin yang mengalir menyebabkan adanya gaya *drag* pada kedua *blade* turbin. Tetapi gaya *drag* yang timbul pada *advancing* dan *returning blade* memiliki perbedaan nilai disebabkan oleh bentuk dari kedua *blade* tersebut terhadap aliran angin. Perbedaan gaya *drag* pada kedua *blade* tersebut menyebabkan adanya torsi yang dapat memutar turbin Savonius. Apabila torsi yang dihasilkan tersebut dikalikan dengan kecepatan angular turbin maka akan didapatkan daya turbin Savonius. Sehingga semakin besar perbedaan gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Untuk memperbesar perbedaan gaya *drag* tersebut dapat dilakukan dengan cara memberi pengganggu di depan *returning blade* sehingga dapat mengurangi gaya *drag* pada *blade* tersebut. Selain itu dapat juga dengan cara mengarahkan aliran udara dari sisi *returning blade* ke *advancing blade* sehingga dapat memperbesar gaya *drag* pada *advancing blade*.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan terkait dalam peningkatan performa turbin angin tipe Savonius. Pada penelitian **Altan et al (2008)** dilakukan percobaan dengan memberikan plat pengganggu di depan *returning blade* dan plat pengarah di depan *advancing blade*. Kedua plat tersebut memiliki panjang ℓ_1 dan ℓ_2 serta besar sudut plat α dan β . Pada percobaan ini digunakan tiga buah variasi panjang dan variasi sudut pada plat pengganggu serta plat pengarah. Pada penelitian ini digunakan *average wind speed* sebesar 7 m/s dan Reynolds Number sebesar $1,5 \times 10^5$. Dari hasil penelitian tersebut, dengan menempatkan ℓ_1 sebesar 45 cm dan ℓ_2 sebesar 52 cm, sudut α sebesar 45° dan sudut β sebesar 15° , didapatkan *Coefficient of Power* relatif meningkat sebesar 38% dengan penyusunan plat pengganggu yang optimum.

Pada penelitian **Mohamed et al (2010)** juga mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe Savonius menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan diberi pengganggu di depan *returning blade* berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta *speed ratio* (λ) dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/s. Penelitian ini membandingkan antara turbin Savonius dengan dua buah sudu dan tiga buah sudu serta diberi pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade* pada masing-masing turbin. Hasil simulasi didapatkan bahwa *power output coefficient* (C_p) dari turbin Savonius dengan dua sudu yang diberi pengganggu dapat meningkat hingga 27,3% pada *speed ratio* (λ) = 0,7 dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$. Sedangkan turbin Savonius dengan tiga sudu yang diberi pengganggu didapatkan bahwa *power output coefficient* (C_p) meningkat hingga 27,5% pada *speed ratio* (λ) = 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$. Dapat disimpulkan bahwa turbin Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu yang diberi pengganggu mempunyai peningkatan nilai C_p hampir sama. Maka dapat digunakan pemilihan turbin Savonius dengan dua sudu yang lebih ekonomis dibandingkan turbin Savonius dengan tiga sudu.

Penelitian yang terbaru dilakukan oleh **Audiyatra (2016)** dengan penempatan plat datar pengganggu pada $L/D = 1,0353$ di depan *returning blade* turbin Savonius dengan variasi sudut ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) untuk variasi bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 . Plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius berpengaruh dalam peningkatan performa turbin angin Savonius, hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin Savonius yang di teliti dibandingkan dengan turbin tanpa diberi pengganggu di depan *returning blade*. Untuk peneliti kali ini, putaran maksimum diperoleh sebesar 2343,33 rpm pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 2,6 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu. Torsi statis maksimum dari turbin angin Savonius (T)

diperoleh sebesar 5,05 $N.cm$ pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=0^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis (T/T_o) didapatkan 2,52 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu. *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius (*CoP*) diperoleh sebesar 1,9% pada bilangan Reynolds 6×10^4 serta *Tip Speed Ratio* (*TSR*) sebesar 0,74 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan *Coefficient of Power* turbin (Cop/Cop_o) didapatkan 15,8 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu. Terdapat kekurangan dari penelitian ini yaitu terjadinya *blockage area* sebesar 15% padahal *blockage area* yang diijinkan dalam sebuah penelitian yang menggunakan wind tunnel yaitu 10% (Ian, 2010). Keakuratan hasil pengukuran torsi dinamis juga masih diragukan karena menggunakan rangkaian alat pengukuran dengan menggunakan rangkaian pembebanan lampu.

Dalam hal optimalisasi performa dari turbin angin Savonius, masih banyak variasi yang dapat dilakukan dalam penelitian. Sehingga dalam penelitian kali ini memiliki fokus pada kenaikan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan pengganggu berupa sebuah plat datar yang berbentuk persegi di depan *returning blade* turbin angin. Plat datar tersebut dipasang dengan sudut kemiringan dengan variasi antara 0° sampai dengan 90° dengan kenaikan 5° pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 .

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonius memiliki sudu yang diklasifikasikan menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*. Dari kedua sudu tersebut mempunyai perbedaan pada kelengkungan dari sudu turbin. *Advancing blade* memiliki kelengkungan berbentuk cekung terhadap arah aliran. Sedangkan bagian *returning blade* memiliki bentuk cembung terhadap arah aliran dan keduanya terletak pada satu poros di bagian tengah sebagai sumbu putarnya. Bentuk turbin Savonius memiliki desain yang sederhana dan biaya pembuatan yang relatif murah, tetapi

memiliki efisiensi yang rendah. Sehingga banyak penelitian terdahulu yang dilakukan dalam hal peningkatan efisiensi dari turbin angin tipe Savonius yaitu salah satunya dengan cara menempatkan sebuah plat pengganggu di depan bagian *returning blade*. Pemberian plat pengganggu ini bertujuan untuk memperkecil gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*. Jika gaya *drag* pada *returning blade* dapat diperkecil maka selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade* menjadi lebih besar. Sehingga torsi yang memutar rotor turbin Savonius akan semakin besar. Dengan semakin besarnya torsi yang memutar rotor turbin Savonius maka koefisien daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Pemasangan plat pengganggu di depan *returning blade* tidak hanya dipasang tegak lurus terhadap aliran angin tetapi dipasang dengan variasi sudut tertentu terhadap arah aliran angin. Hal ini diharapkan agar plat pengganggu bukan hanya untuk menghalangi aliran pada *returning blade* sehingga memperkecil gaya *drag* pada *returning blade* tetapi juga dapat berfungsi sebagai pengarah aliran angin. Aliran angin yang menuju ke bagian *returning blade* akan membentur plat pengganggu dan akan dibelokkan menuju ke *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* akan meningkat. Dengan adanya plat pengganggu juga membuat gaya *drag* yang diterima *returning blade* akan berkurang. Dengan meningkatnya gaya *drag* pada *advancing blade* dan menurunnya gaya *drag* yang diterima *returning blade* menyebabkan selisih gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade* akan semakin besar. Torsi yang akan memutar rotor turbin Savonius juga akan semakin besar sehingga koefisien daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Pada penelitian kali ini akan digunakan turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa plat datar berbentuk persegi panjang dengan variasi sudut antara plat pengganggu dan bidang tegak lurus arah gerak aliran fluida serta jarak antara *returning blade* turbin angin dengan plat pengganggu yang telah ditentukan. Hipotesa dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penempatan plat pengganggu yang berbentuk persegi di depan *returning blade* pada turbin Savonius akan berpengaruh terhadap gaya *drag* yang dialami oleh *returning blade*. Hal ini diharapkan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade* akan berkurang karena bagian depan *returning blade* tertutup oleh plat datar berbentuk persegi dan berakibat pada kenaikan torsi yang dihasilkan sehingga koefisien daya yang dihasilkan akan meningkat pula.

2. Variasi sudut dari plat pengganggu sebagai pengarah aliran fluida atau angin sehingga aliran yang menuju ke bagian *advancing blade* akan lebih banyak. Hal tersebut diduga akan berpengaruh terhadap peningkatan gaya *drag* yang diterima *advancing blade*. Sehingga akan berdampak terhadap kenaikan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dengan meningkatnya selisih gaya *drag* maka torsi pada rotor turbin Savonius akan semakin besar dan koefisien daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Namun semakin besar sudut plat pengganggu terhadap turbin tidak selalu membuat daya yang dihasilkan turbin juga semakin besar. Mengingat sudut bukaan plat pengganggu yang semakin besar, melebihi sudut optimumnya, akan justru mengakibatkan selisih gaya *drag* kedua sudu menurun. Hal ini karena timbulnya gaya *drag* pada *returning blade* oleh angin yang menerobos di sisi ujung plat pengganggu yang semakin membuka. Hipotesa kali ini yaitu akan terdapat sudut yang menghasilkan torsi dan daya turbin savonius maksimal.

Untuk membuktikan hipotesa diatas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin tipe Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 101,6 mm serta plat pengganggu berupa plat persegi dengan lebar (L) = 105,2 mm, maka nilai $L/D = 1,035$. Sudut penempatan plat pengganggu divariasikan dari 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 .

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sehingga bahasan yang akan dilakukan tidak melebar dari tujuan yang ada. Adapun batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform*, dengan bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 .
2. Analisa dilakukan pada turbin angin tipe Savonius dengan $L/D = 1,035$ dimana dalam eksperimen ini digunakan diameter sudu turbin (D) = 101,6 mm dan pengganggu berupa plat datar berbentuk persegi panjang dengan lebar (L) = 105,2 mm dan tinggi (H) = 300 mm.
3. Variasi sudut halang penempatan plat datar pengganggu yang digunakan sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° .
4. Perpindahan panas akibat gesekan antara benda uji dengan aliran fluida dapat diabaikan.
5. Penelitian dilakukan dengan menggunakan aliran udara satu arah.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari studi eksperimental ini adalah meningkatkan performa turbin angin tipe Savonius dengan meningkatkan plat pengganggu berukuran $L/D = 1,035$ dengan variasi sudut pengganggu $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 dengan cara:

1. Mengukur putaran dari turbin angin Savonius,
2. Mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius,
3. Mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius,
4. Menghitung *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin Savonius.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan energi terbarukan khususnya dengan sumber energi angin.
2. Mampu menjelaskan pengaruh pemberian plat pengganggu terhadap nilai torsi, putaran dan *coefficient of power* turbin Savonius.
3. Mampu menjelaskan pengaruh sudut antara plat pengganggu dan bidang tegak lurus aliran fluida terhadap nilai torsi, putaran dan *coefficient of power* turbin Savonius.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kecepatan Angin di Indonesia

Angin adalah udara yang bergerak akibat rotasi bumi dan perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Perbedaan tekanan udara ini disebabkan oleh perbedaan suhu pada daerah tersebut. Besarnya suhu dipengaruhi oleh penyinaran matahari. Daerah yang menerima lebih banyak penyinaran matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lainnya sehingga menyebabkan udara bergerak mengembang dan tekanannya menjadi rendah. Sedangkan pada daerah yang bersuhu rendah memiliki tekanan yang tinggi. Penyinaran matahari dapat dilihat dari letak Indonesia yaitu antara 11° Lintang Utara (LU) sampai 6° Lintang Selatan (LS) dan 96° Bujur Barat (BB) sampai 141° Bujur Timur (BT). Berdasarkan letak astronomis tersebut wilayah Indonesia dilewati oleh garis khatulistiwa yang menyebabkan Indonesia mempunyai iklim tropis dan mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun.

Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau sering juga disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah salah satu pembangkit listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja yang baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik energi terbarukan lainnya. Dari data Blueprint Energi Nasional Departemen ESDM RI, dapat dilihat bahwa potensi PLTB di Indonesia sangat menarik untuk dikembangkan karena dari potensi sebesar 9,29 GW, baru sekitar 1,6 MW yang dikembangkan, yang berarti baru sekitar 0,017%. Pada daerah sepanjang garis khatulistiwa memiliki kecepatan angin yang rendah. Iklim tropis ini menyebabkan Indonesia memiliki kecepatan angin yang rendah karena memiliki suhu yang tinggi. Akibatnya potensi angin pada daerah khatulistiwa sangat kecil. Hal ini menjadi masalah bagi pengembangan pembangkit energi angin di Indonesia yaitu pengembangan tidak bisa dilakukan secara

optimal. Permasalahan yang dihadapi yaitu rendahnya distribusi kecepatan angin di Indonesia dan besarnya fluktuasi kecepatan angin di Indonesia. Fluktuasi yang dimaksudkan adalah kecepatan angin yang sering melonjak beberapa saat. Namun Indonesia adalah negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu $\pm 80.791,42$ Km merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin.

Data angin untuk Indonesia diperoleh dari berbagai pengukuran angin seperti dari Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. Berdasarkan data yang terkumpul, sekitar 166 lokasi di Indonesia telah diukur untuk potensi energi angin. Hasilnya menunjukkan bahwa 35 lokasi memiliki potensi energi angin yang baik, dengan rata-rata kecepatan angin diatas 5 m/s. Selain itu, sekitar 34 lokasi juga memiliki energi angin yang cukup untuk dikembangkan, dengan rata-rata kecepatan angin berkisar antara 4 - 5 m/s. Rangkuman kecepatan angin rata - rata untuk beberapa lokasi di Indonesia di ketinggian 50 meter yang ditabulasikan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Potensi angin beberapa wilayah di Indonesia
(Soeripno et al, 2013)

Resources potential	Wind Speed at 50 m , (m/s)	Wind Power density, at 50 m , (W/m ²)	Number of sites	Provinces
Marginal	3,0 – 4,0	< 75	84	Maluku, Papua, Sumba, Mentawai, Bengkulu, Jambi, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi, North Sumatera, Central Java, Maluku, DIY, Lampung, Kalimantan
Fair	4,0 – 5,0	75 - 150	34	Central and East Java, DIY, Bali, Bengkulu, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi
good	> 5,0	> 150	35	Banten, DKI, Central and West Java, DIY, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi, Maluku

Source: LAPAN Wind Data .

2.2 Turbin Angin

Angin telah lama menjadi sumber energi pada kehidupan manusia. Aplikasi dari penggunaan energi angin tersebut dengan menggunakan kincir angin atau turbin angin. Turbin angin merupakan suatu perangkat mekanis yang dirancang khusus untuk mengkonversi sebagian energi kinetik menjadi energi mekanik yang berguna. Energi mekanis yang berupa putaran poros turbin akan dihubungkan pada sebuah generator untuk diubah menjadi energi listrik. Turbin angin pada saat ini telah banyak diaplikasikan di beberapa negara sebagai pembangkit energi listrik utama. Berbagai desain turbin angin telah dikembangkan dan sebagian besar dari desain tersebut memutar *propellernya* dengan *lift force* atau *drag force* yang merupakan hasil dari interaksi dengan angin. Secara umum turbin angin yang banyak digunakan dibagi menjadi dua yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT).

2.2.1 *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) merupakan turbin angin komersial dengan tipe lama yang biasanya banyak digunakan. Ciri khas dari turbin angin tipe ini adalah memiliki *shaft* rotor dan generator pada puncak tower dan harus diarahkan ke arah tiupan angin. Sebagian besar turbin yang besar memiliki *gearbox* yang merubah kecepatan putar rotor yang ditransfer ke generator menjadi lebih cepat.

HAWT biasanya digunakan untuk tipe angin yang memiliki kecepatan sedang dan tinggi dengan profil *bladenya* berbentuk *airfoil* atau disebut juga *asymmetrical aerodynamic profile* yang jika terkena aliran angin akan menimbulkan gaya angkat (*lift*) dan gaya angkat tersebut yang menyebabkan putaran pada turbin. Turbin jenis ini digunakan di pembangkit tenaga listrik dan biasanya memiliki rotor berjumlah dua atau tiga *blade*. Untuk menggerakkan *blade* di turbin angin jenis ini, dibutuhkan gaya *lift* dari angin yang bertiup. Turbin angin ini memiliki poros rotor

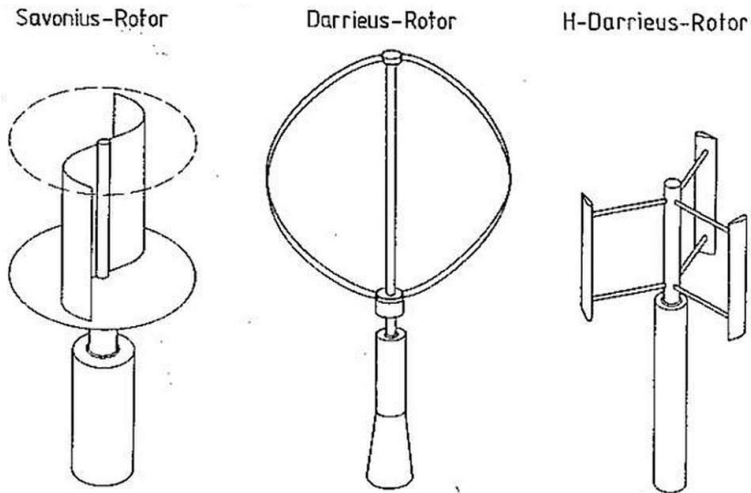
utama dan generator listrik di puncak menara dan diarahkan ke arah datangnya angin untuk dapat memanfaatkan tenaga angin. Turbin HAWT memiliki efisiensi yang relatif tinggi. Selain itu, semakin tinggi menara turbin maka semakin besar pula kecepatan putaran turbin. Namun kekurangan dari tipe turbin ini yaitu dibutuhkan biaya instalasi yang lebih mahal dalam membangun menara, panjang sudu turbin, serta dibutuhkan penyangga yang kokoh untuk meletakkan *gearbox*, sudu dan generator.



Gambar 2.1 Salah satu contoh turbin angin horisontal
(Turbinesinfo, 2017)

2.2.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbin angin dengan poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap arah datangnya aliran angin. Gerakan putaran poros dan sudu dari turbin jenis ini sejajar dengan arah aliran angin sehingga turbin ini dapat berputar pada semua arah aliran angin. Berikut merupakan beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



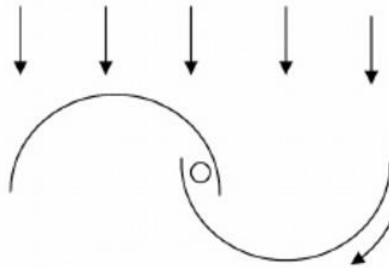
Gambar 2.2 Jenis turbin angin sumbu vertikal (Margrét Ósk Óskarsdóttir, 2014)

Turbin angin vertikal juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, hal ini mengakibatkan *start up* turbin angin vertikal membutuhkan angin dengan kecepatan lebih rendah dibandingkan turbin angin horizontal. Kelebihan lainnya adalah generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah proses perbaikan dan pergantian part serta dapat menerima angin di segala arah. Kekurangannya yaitu, efisiensi lebih rendah apabila dibandingkan turbin angin horizontal. Perbedaan dari jenis turbin angin di gambar 2.2 yaitu pada turbin tipe Savonius memanfaatkan gaya *drag* sedangkan turbin tipe Darrieus memanfaatkan gaya *lift*.

2.3 Turbin Angin Savonius

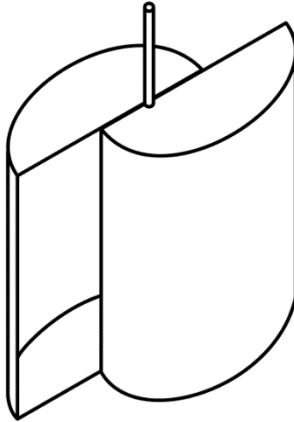
Turbin angin tipe Savonius dikenalkan untuk pertama kali pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius. Sebenarnya kincir angin sendiri sudah ditemukan di abad ke 5 di Persia dan mulai menyebar di seluruh bagian negara Eropa. Turbin

tersebut merupakan turbin jenis VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau elips) yang disusun sehingga membentuk seperti huruf 'S' ketika dilihat dari atas. Turbin ini juga disebut sebagai turbin *drag* karena cara menggerakannya memanfaatkan gaya *drag*. Kelebihan dari turbin angin Savonius adalah tidak memerlukan torsi awal untuk memutarinya dan sebagai sumber listrik untuk keperluan yang kecil.



Gambar 2.3 Arah aliran angin turbin Savonius (David Spera, 2008)

Rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Sudu dari turbin Savonius (*Savonius Blade*) diklasifikasikan menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*. Koefisien hambat permukaan cekung (*advancing blade*) lebih besar dari pada permukaan cembung (*returning blade*). Oleh karena itu, gaya *drag* yang diterima pada bagian *advancing blade* akan lebih besar dibandingkan dengan yang diterima pada bagian *returning blade* dan akan menyebabkan turbin berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya. Skema sudu dari turbin angin Savonius dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sudu turbin angin Savonius (David Spera, 2008)

2.4 Gaya Drag

Gaya aerodinamika timbul dari sebuah benda yang dialiri aliran *viscous* dan *incompressible*. Gaya tersebut dihasilkan karena adanya tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya yang sejajar horizontal dengan arah aliran disebut dengan gaya *drag*, sedangkan gaya dengan arah vertikal atau tegak lurus dengan arah *free stream* disebut dengan gaya *lift*. Gaya *drag* yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda). Gaya *drag* juga bisa terjadi berupa *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Gaya *drag* seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag* (C_D) yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui gaya hambat dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

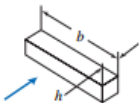




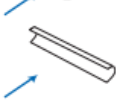
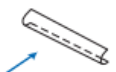
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

- F_D = gaya *drag* (N)
 ρ = massa jenis udara (kg/m^3)
 U = kecepatan udara (m/s)
 A = luas permukaan benda (m^2)

Koefisien drag merupakan bilangan tak berdimensi yang diperoleh dari hasil integrasi dan distribusi tekanan sepanjang kontur benda yang merupakan kontribusi dari *normal pressure* atau *pressure drag*. Nilai koefisien drag pada berbagai permukaan benda dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai *coefficient of drag* pada beberapa bentuk benda (Pritchard et al, 2011)

Object	Diagram	$C_D (Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05 $b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

^aData from Hoerner [16].
^bBased on ring area.

2.5 Perhitungan Torsi Statis

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari kecenderungan sebuah gaya untuk menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Pada turbin, besar torsi bergantung pada kecepatan angin dan sudu turbin serta dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \dots\dots\dots(2.2)$$

Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2 maka Torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana :

T = Torsi yang dihasilkan dari putaran poros (N.m)

F_D = Gaya drag (N)

R = Jari-jari turbin (m)

2.6 Bilangan Reynolds

Pada aliran *incompressible*, pembagian aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan tak berdimensi yaitu bilangan Reynolds. Jenis lapis batas pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan Reynolds (Re). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas, gaya *viscous* dan gaya inersia sangat penting. Sementara bilangan Reynolds sendiri menunjukkan rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana,

$$\text{Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) L^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L}) L^2} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana,

ρ = Densitas fluida (kg/m³)

U = Kecepatan *free stream* fluida (m/s)

L = Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)

μ = Viskositas dinamis fluida (N.s/m²)

Dalam studi eksperimen ini panjang karakteristik yang dimaksud adalah diameter turbin (d) dengan persamaan $d=2D-b$, dimana D =diameter sudu turbin dan b =lebar *overlap* antara kedua sudu turbin. Maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\mu} = \frac{\rho \cdot U \cdot (2D-b)}{\mu} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.7 Perhitungan Daya

Prinsip utama dari turbin angin adalah laju energi angin yang dapat dikonversikan oleh turbin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan dikonversikan menjadi hitungan daya yang menjadi indikator performa dari turbin angin Savonius.

2.7.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Besarnya laju energi angin yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin angin secara teoritis dipengaruhi oleh energi kinetik yang dihasilkan oleh udara serta laju aliran massa dari udara. Besarnya energi kinetik dapat dihitung secara menggunakan rumus berikut dengan udara yang memiliki massa (m) dan kecepatan (U):

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \dots\dots\dots(2.9)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu:

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \dots\dots\dots(2.10)$$

Sehingga energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U \times U^2$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan:

E_k = energi kinetik (Joule)

P_w = daya kinetis angin (Watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A = luas penampang turbin (m^2)

U = kecepatan udara (m/s)

Besar daya di atas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Dari daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin angin.

2.7.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin

Pada perhitungan daya aktual turbin (P_T) pada perencanaannya akan diukur menggunakan *brake* dyamometer dimana alat tersebut menghitung besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh aliran fluida pada turbin angin Savonius. Perhitungan daya aktual turbin (P_T) dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$P_T = T\omega \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan:

P_T = Daya aktual turbin (watt)

T = Torsi dinamis turbin yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan *brake* dynamometer (N-m)

Ω = Kecepatan putaran turbin angin Savonius (rad/s)

Besarnya torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T = F r \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan:

r = radius *pulley* (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat diukur dengan rumus berikut:

$$F = |m - s|g \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan:

m = massa pemberat (kg)

s = pegas yang terbaca (kg)

g = akselerasi gravitasi (m/s^2)

Kecepatan putaran turbin angin Savonius dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan:

n = gerak rotasi poros turbin angin Savonius (rpm)

Dengan menggunakan persamaan 2.13, 2.14 dan 2.15, maka didapatkan persamaan berikut:

$$P_T = \frac{|m-s|g r \pi n}{30} \dots\dots\dots(2.16)$$

2.7.3 Coefficient of Power

Coefficient of power (CoP) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu oleh turbin angin terhadap daya yang dihasilkan oleh *drag force* yang dihasilkan oleh aliran udara. Persamaan *coefficient of power (CoP)* dapat ditulis sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_T}{P_w}$$

$$CoP = \frac{\frac{|m-s|g r \pi n}{30}}{\frac{1}{2}\rho.A.U^3}$$

$$CoP = \frac{|m-s|g r \pi n}{15.\rho.A.U^3} \dots\dots\dots(2.17)$$

2.7.4 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. *TSR* dilambangkan dengan λ .

$$TSR = \frac{\omega R}{U} \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan:

- TSR = *tip speed ratio*
- ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)
- R = jari-jari turbin (m)
- U = kecepatan angin (m/s)

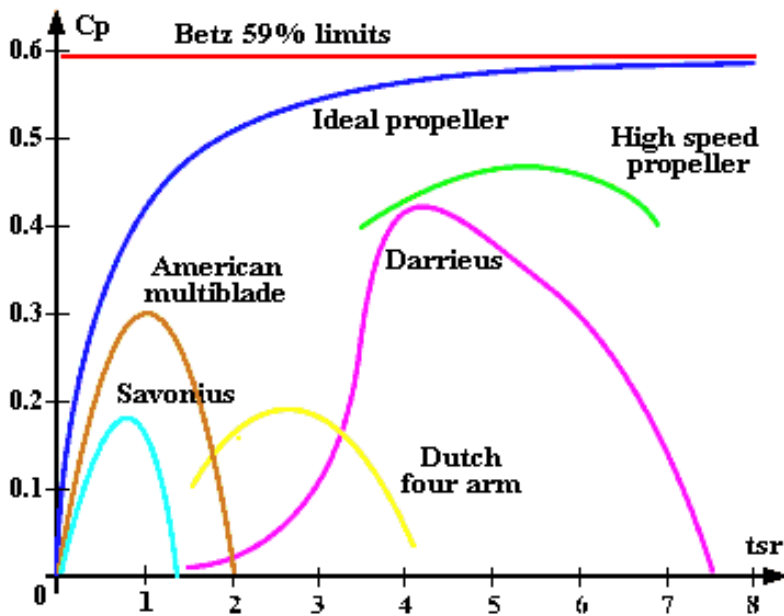
Selain menggunakan persamaan (2.18), *TSR* juga dapat diperoleh dari persamaan :

$$TSR = \frac{\text{blade tip speed}}{U} \dots\dots\dots(2.19)$$

Blade tip speed merupakan kecepatan ujung *blade* atau rotor, dimana :

$$\text{Blade tip speed} = \frac{\text{rotational speed (rpm)} \times \pi \times D}{60} \dots\dots(2.20)$$

Karena setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari *TSR* juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.5 berikut:



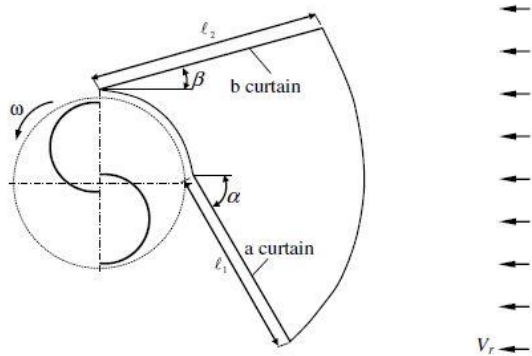
Gambar 2.5 Grafik nilai coefficient of power sebagai fungsi tip speed ratio untuk berbagai turbin angin (Al-Shemmeri, 2010)

2.8. Penelitian Terdahulu

Untuk memudahkan penelitian ini, maka diperlukan beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut yang akan dijabarkan yaitu :

2.8.1 Studi Eksperimen Turbin Angin Savonius Berpengganggu

Penelitian mengenai studi eksperimen ini telah dilakukan oleh **Altan et al (2008)** mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius dengan menambahkan pengganggu berupa plat yang berfungsi untuk mendefleksi angin. Penelitian dilakukan dengan ukuran diameter (D) dan tinggi rotor (H) sebesar 32 cm. Tebal plat yang digunakan untuk membuat blade yaitu 2 mm. Plat setebal 4 mm diletakkan di depan turbin dengan sudut α dan β terhadap arah datangnya aliran udara dan disusun seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema turbin angin Savonius berpengganggu (**Altan et al, 2008**)

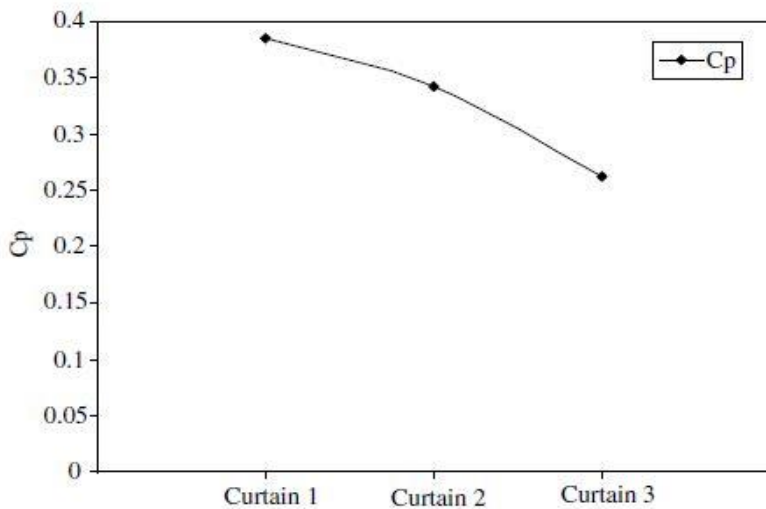
Sudut α dan β pada susunan di atas divariasikan dengan sudut α dari 30° hingga 60° dan sudut β dari 0° hingga 15° . Pada penelitian ini dilakukan pada kecepatan angin 7 m/s dengan nilai $Re = 1,5 \times 10^5$. Ada tiga macam variasi panjang plat di l_1 dan l_2

dari plat pengganggu yang digunakan. Ketiga jenisnya ditunjukkan di tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3 Variasi panjang dari plat pengganggu dan pengarah
(Altan et al, 2008)

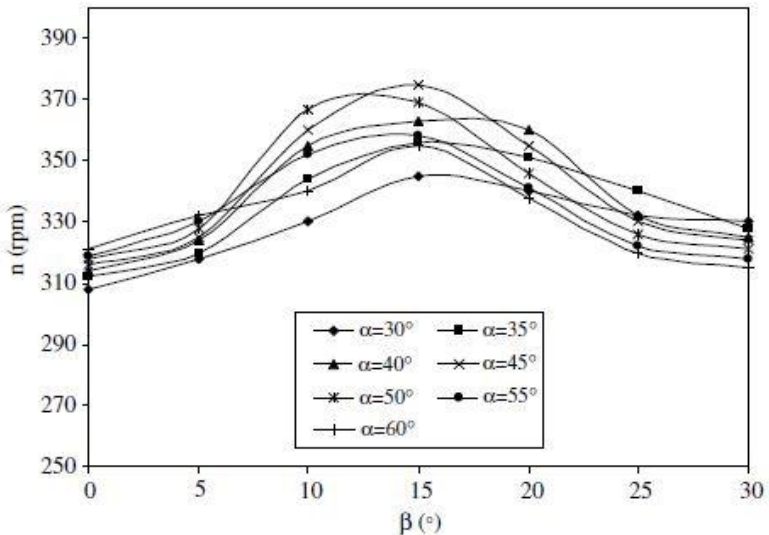
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Dari penelitian tersebut didapatkan nilai *Coefficient of Power* pada *curtain 1* sebesar 0,38533, pada *curtain 2* sebesar 0,34154 dan pada *curtain 3* sebesar 0,26273. *Coefficient of Power* optimal adalah menggunakan *curtain 1* ($\ell_2 = 45\text{cm}$ dan $\ell_2 = 52\text{cm}$) dengan variasi sudut α sebesar 45° dan β sebesar 15° . Hasilnya dapat dilihat di gambar 2.7.



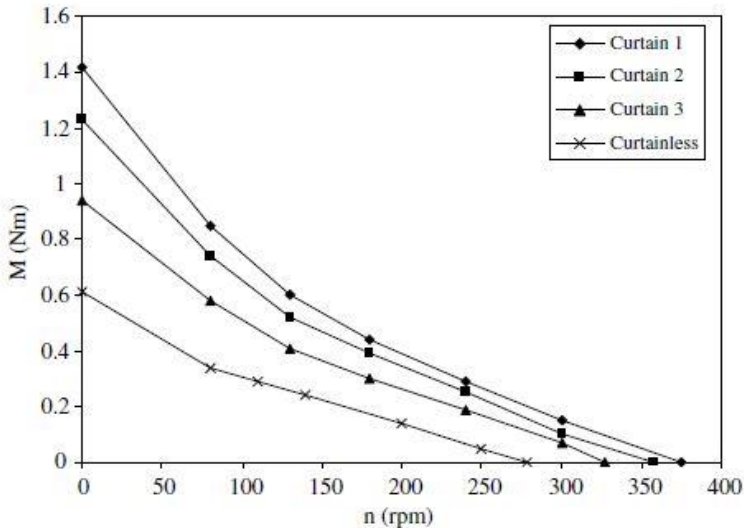
Gambar 2.7 Grafik pengaruh penambahan plat pengganggu terhadap nilai *coefficient of power* (Altan et al, 2008)

Selain itu penambahan plat pengganggu dan pengarah juga berpengaruh terhadap putaran turbin rotor Savonius. Hasil pengukuran putaran rotor turbin dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Grafik pengaruh putaran turbin terhadap sudut plat pengganggu 1 (Altan et al, 2008)

Penambahan plat pengganggu juga berpengaruh terhadap nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin Savonius. Pengaruh nilai torsi yang dihasilkan terhadap putaran dan penambahan plat pengganggu dapat dilihat pada gambar 2.9.



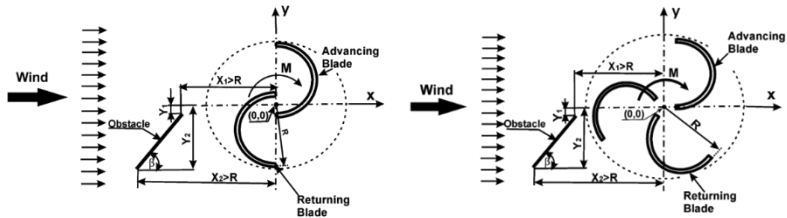
Gambar 2.9 Grafik pengaruh torsi yang dihasilkan terhadap putaran turbin (Altan et al, 2008)

Dari grafik-grafik diatas didapatkan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu bahwa *coefficient of power* dari turbin Savonius meningkat sebesar 38,5% apabila diberi pengganggu dengan panjang l_1 sebesar 45cm dan l_2 sebesar 52cm dengan sudut pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

2.8.2 Simulasi Pengoptimalisasian Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu di Sisi *Returning Blade*

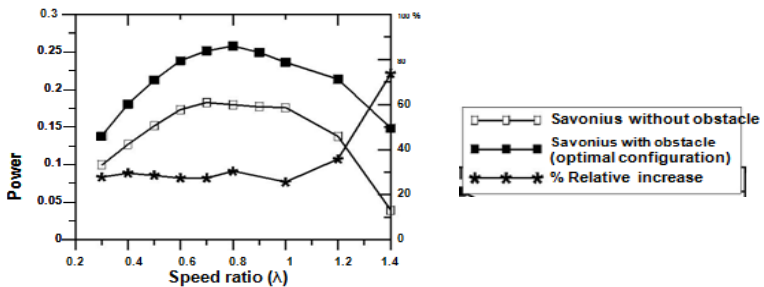
Penelitian dari Mohamed et al (2010) mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe Savonius menggunakan *software* CFD dan diberi pengganggu di depan *returning blade* berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta *tip speed ratio* (TSR) dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/s. Simulasi ini membandingkan antara turbin

Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu serta masing-masing dengan atau tanpa diberi pengganggu.

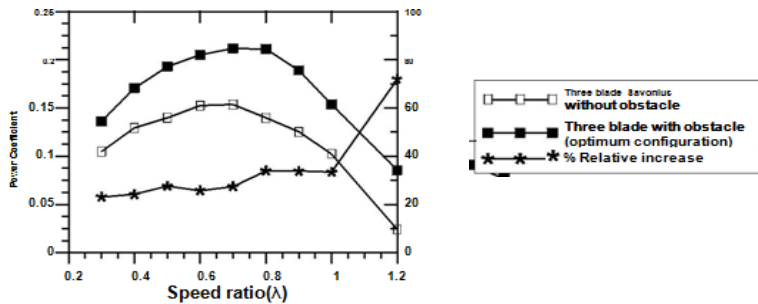


Gambar 2.10 Skema alat penelitian pada turbin angin tipe Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

Hasil simulasi didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,3% pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$ dengan menggunakan dua buah sudu berpengganggu. Sedangkan apabila menggunakan tiga buah sudu berpengganggu, hasil dari *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,5% pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$.

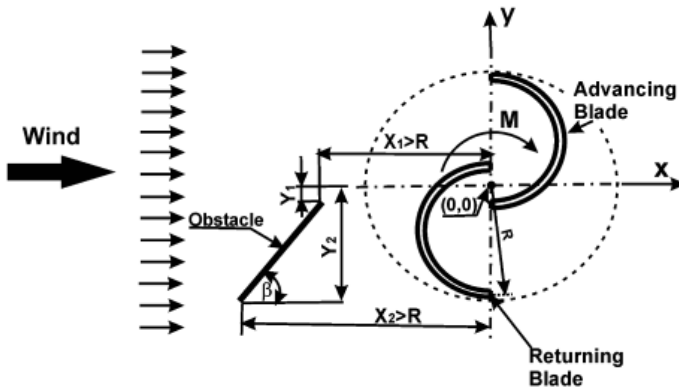


Gambar 2.11 Grafik hubungan antara *speed ratio* dan *power coefficient* (*CoP*) pada turbin angin Savonius dengan dua sudu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2.12 Grafik hubungan antara *speed ratio* dan *power coefficient* (*CoP*) pada turbin angin Savonius dengan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

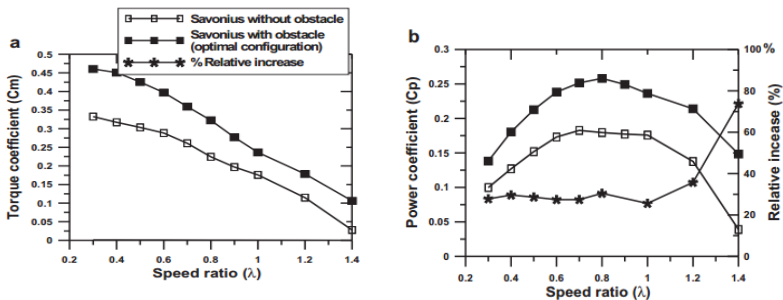
Penelitian lain untuk meningkatkan performa turbin Savonius dari Mohamed et al (2010) diberi pengganggu di depan *returning blade* berupa plat datar dengan sudut benda pengganggu (β). Variasi yang digunakan adalah nilai *speed ratio* (*TSR*) pada rentang 0,3 – 1,4. Data yang diambil untuk mendukung penelitian ini adalah nilai *torque coefficient* (*Cm*) dan *power coefficient* (*CoP*).



Gambar 2.13 Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin Savonius dengan diberi pengganggu berupa plat datar dengan sudut tertentu (Mohamed et al, 2010)

Hasil yang didapatkan tertera pada gambar 2.14 (a) dan (b). Pada gambar 2.14 (a) data grafik nilai C_m terhadap variasi *speed ratio* ditunjukkan besar C_m semakin menurun ketika *speed ratio* semakin tinggi. Pengaruh benda pengganggu menghasilkan nilai C_m yang lebih besar dibandingkan konfigurasi turbin Savonius tanpa pengganggu. Nilai C_m terbukti meningkat sebesar 0,068 dengan menggunakan konfigurasi benda pengganggu.

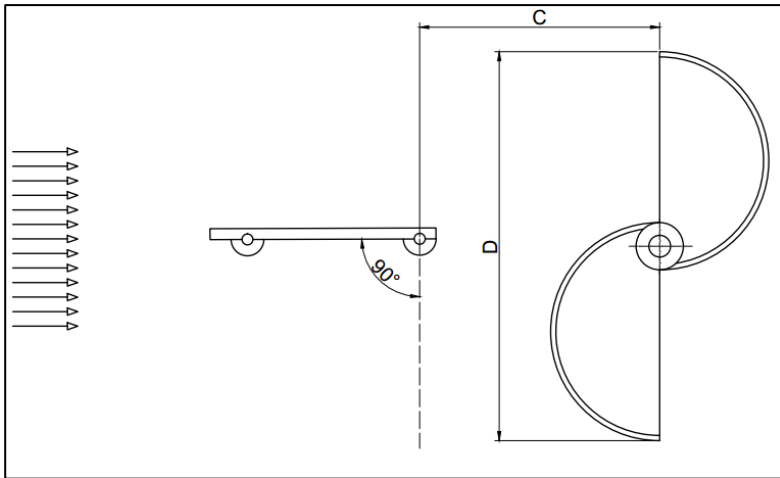
Gambar 2.14 (b) data grafik nilai CoP terhadap perubahan *speed ratio* menunjukkan adanya pengaruh kenaikan besar CoP akibat adanya benda pengganggu. Nilai CoP akibat adanya benda pengganggu mengalami kenaikan secara keseluruhan sebesar 27,3%. Konfigurasi optimal didapatkan pada sudut ($\beta = 100,83^\circ$) dengan besar $CoP = 0,2503$.



Gambar 2.14 Grafik pengaruh *speed ratio* terhadap (a) *torque coefficient* dan (b) *power coefficient* (Mohamed et al, 2010)

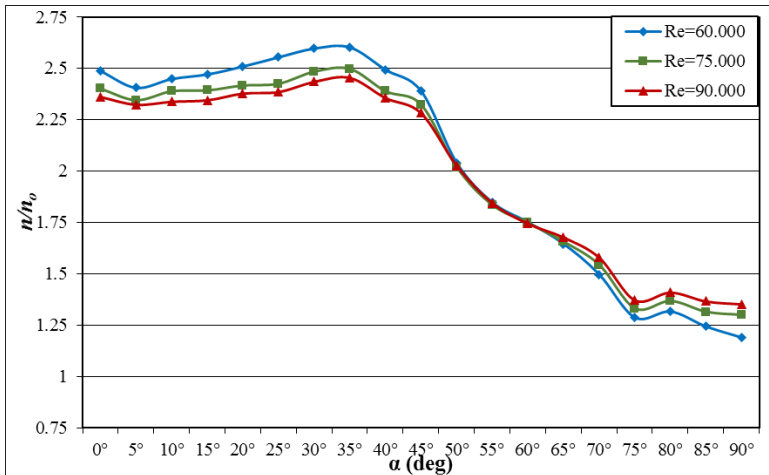
2.8.3 Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu Plat Datar

Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa plat datar yang diposisikan di depan *returning blade* turbin Savonius, dilakukan oleh **Audiyatra Aji R (2016)** dengan $L/d = 1,0353$ di depan *returning blade* turbin Savonius pada variasi sudut ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) untuk variasi bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 .



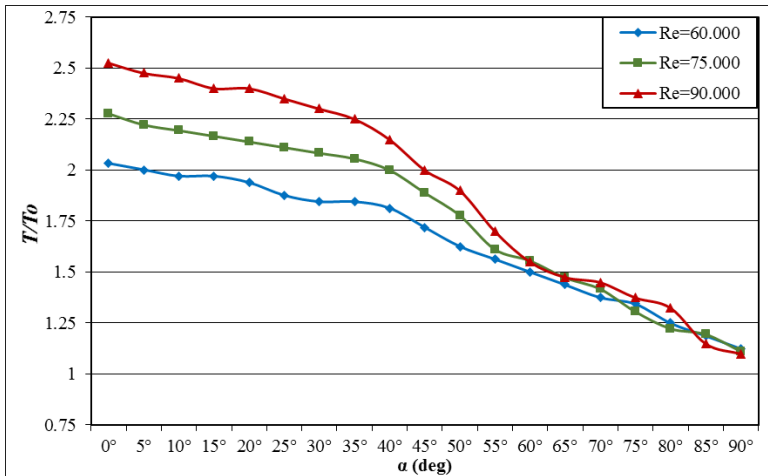
Gambar 2.15 Posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90° (Audiyatra, 2016)

Hasil penelitian didapatkan bahwa plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius berpengaruh dalam peningkatan performa turbin angin Savonius, hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin Savonius yang di teliti dibandingkan dengan turbin tanpa diberi pengganggu di depan *returning blade*. Putaran maksimum dari turbin angin Savonius (n) diperoleh sebesar 2343,33 *rpm* pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 2,6 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$.



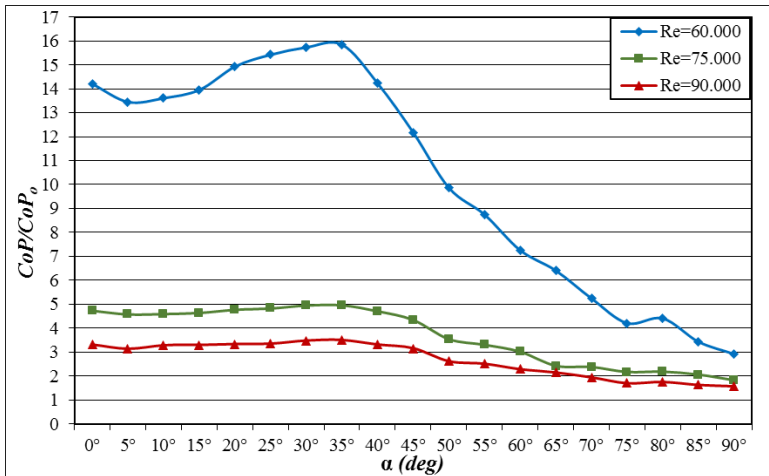
Gambar 2.16 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audyatra, 2016)

Untuk torsi statis maksimum dari turbin angin Savonius (T) diperoleh sebesar $5,05 \text{ N.cm}$ pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=0^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis (T/T_o) didapatkan 2,52 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=0^\circ$.



Gambar 2.17 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audyatra, 2016)

Sedangkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius (CoP) diperoleh sebesar 1,9% pada bilangan Reynolds 6×10^4 serta *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 0,74 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan *Coefficient of Power* turbin (Cop/Cop_o) didapatkan 15,8 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$.



Gambar 2.18 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut halang (α) (Audyatra, 2016)

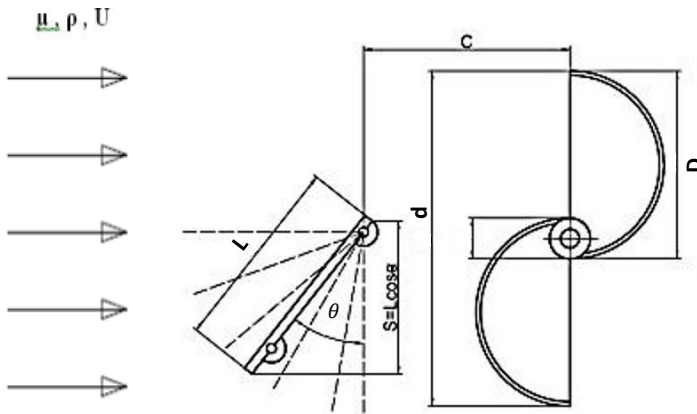
Dalam penelitian ini masih perlu adanya penyempurnaan karena diperlukan rangkaian alat dalam pengukuran torsi dinamis dari turbin angin tipe Savonius yang akan dikonversikan menjadi daya *output* sehingga dapat dibandingkan dengan hasil daya *output* yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan rangkaian pembebanan lampu. Penelitian ini juga terjadi *blockage area* sebesar 15% padahal *blockage ratio* yang diijinkan dalam sebuah penelitian yang menggunakan wind tunnel yaitu 10% (Ian, 2010).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter yang Diukur

Pada gambar di bawah ini dapat dilihat skema penelitian (tampak atas) dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini. Fungsi dari analisa ini adalah untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu penelitian atau tidak. Parameter yang mempengaruhi penelitian kali ini adalah densitas fluida, kecepatan fluida, viskositas fluida, lebar plat datar pengganggu, diameter turbin, tinggi turbin, panjang plat datar pengganggu, jarak antara *returning blade* turbin Savonius dengan plat datar pengganggu, putaran sudu dan diameter *overlap*.

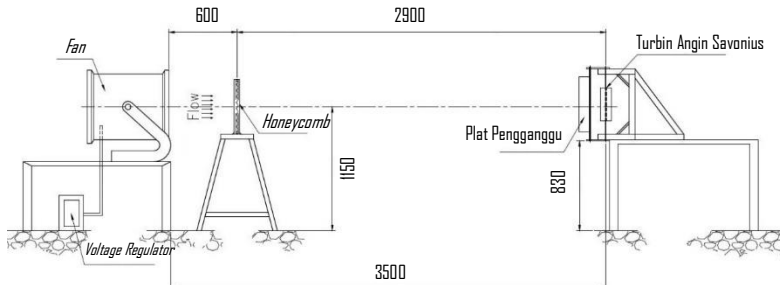


Gambar 3.1 Skema benda uji

dimana :

- ρ = massa jenis udara (kg/m^3)
- μ = viskositas udara (Ns/m^2)
- U = kecepatan aliran udara (m/s)
- D = diameter sudu turbin Savonius (m)
- S = proyeksi lebar plat pada turbin Savonius (m)

- L = lebar plat pengganggu (m)
- θ = sudut plat pengganggu
- b = diameter *overlap* (m)
- H = tinggi turbin (m)



Gambar 3.2 Skema penelitian

Pada penelitian ini benda uji akan dialiri udara dari *fan* yang ditempatkan sejauh 3,5 meter dari benda uji. Untuk menghasilkan aliran udara yang linier ditempatkan *honeycomb* diantara *fan* dan benda uji. Kecepatan aliran udara dari *fan* diatur dengan mengubah tegangan listrik menggunakan *voltage regulator*. Skema penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2.

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa plat datar. Metode analisa yang digunakan adalah dengan Teorema Phi Buckingham.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Metodologi penentuan analisa dimensi yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, U, D, L, S, H, b, n)$$

Jumlah parameter (n) = 10 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

P = Power (J/s)

- ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)
 μ = Viskositas udara (Ns/m^2)
 U = Kecepatan aliran (m/s)
 D = Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
 L = Lebar plat pengganggu (m)
 S = Proyeksi lebar plat pada turbin Savonius (m)
 H = Tinggi turbin angin Savonius (m)
 b = Diameter *overlap* (m)
 n = Putaran sudu turbin angin Savonius (rpm)

- Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.
Dipilih M , L , t .
- Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Tabel 3.1 Dimensi primer parameter

Parameter	P	ρ	μ	U	D	L	S	H	b	n
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

- Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ , U , D .
Jumlah parameter berulang (m) = $r = 3$.
- Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $n - m = 10 - 3 = 7$ grup tanpa dimensi.

$$i. \pi_1 = \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

ii. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{L}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{n D}{U}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = \text{Coefficient of Power}$$

$$\pi_2 = \text{bilangan Reynolds}$$

$$\pi_3 = \text{ratio lebar plat pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius}$$

$$\pi_4 = \text{ratio lebar proyeksi plat dengan diameter sudu turbin angin Savonius}$$

π_5 = ratio tinggi turbin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_6 = ratio diameter overlap dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_7 = *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{L}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{n D}{U}\right)$$

Pada penelitian ini $\frac{L}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}$ dan $\frac{n D}{U}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}, \frac{n D}{U}\right)$$

Dalam hal ini d sebanding dengan D untuk $d = 2D - b$ dengan b tetap dan nilai $S = L \cdot \cos \theta$ dengan nilai L yang tetap maka didapatkan :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_3\left(\frac{\mu}{\rho U d}, \frac{S}{D}, \frac{n D}{U}\right)$$

atau

$$\text{CoP} = f_4(\text{Re}, \theta, \text{TSR})$$

3.3 Metode Eksperimen

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan guna melanjutkan pengambilan data eksperimen.

3.3.1 *Fan dan Volatage Regulator*

Pada penelitian ini menggunakan *fan* untuk menghasilkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin Savonius. *Fan* yang digunakan yaitu **CKE SPV-18**. *Fan* ini tidak terdapat pengaturan kecepatan putaran kipas, sehingga diperlukan *voltage regulator* untuk mengatur aliran udara dengan cara pengaturan kecepatan kipas pada *fan*. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.2



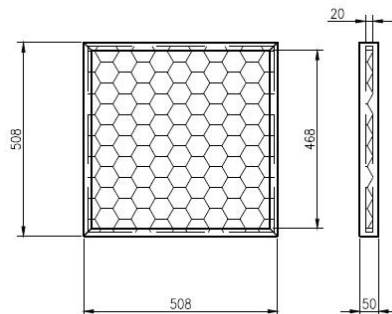
Gambar 3.3 *Fan Portbale CKE-SPV 18*

Tabel 3.2 Spesifikasi *fan* CKE SPV-18

SPECIFICATIONS	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 RPM
Air Flow	4413 CFM
Power	1700 Watt
ST Press	520 Pa
Phase	1
Voltage	220 – 240 V

3.3.2 *Honeycomb*

Pada penelitian ini menggunakan *honeycomb* untuk menyearahkan aliran udara yang akan melewati turbin angin Savonius. *Honeycomb* berfungsi untuk mengembangkan atau menghasilkan aliran udara yang halus sehingga aliran udaranya lebih *uniform*. *Honeycomb* yang digunakan berbentuk persegi dengan dimensi panjang sisi *honeycomb* sebesar 468 mm, panjang sisi *frame* sebesar 508 mm, tebal *honeycomb* sebesar 20 mm, tebal *frame* sebesar 50mm, dan ukuran *meshing* sebesar 16 lubang/in². Seperti pada skema berikut:

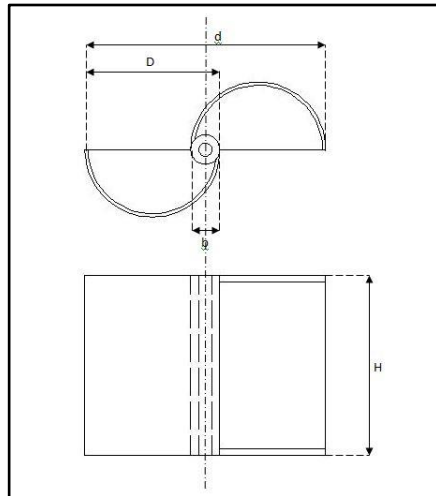
**Gambar 3.4** Skema *honeycomb*

3.3.3 Benda Uji

Pada penelitian ini, sebagai benda kerja digunakan turbin angin tipe Savonius dengan pengganggu berupa plat. Turbin angin Savonius menggunakan *bearing high speed tipe i ball bearing 6202 THB P63 IBC*.

a. Profil turbin angin tipe Savonius sebagai berikut :

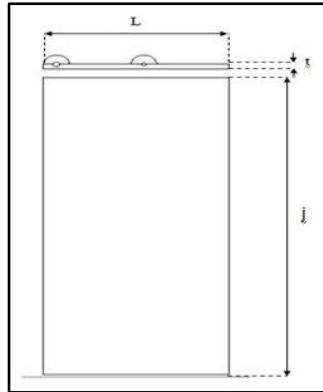
- Diameter sudu turbin (D) : 101,6 mm
- Tinggi (H) : 300 mm
- Panjang karakteristik (d) : 190,2 mm
- Diameter overlap (b) : 13 mm



Gambar 3.5 Skema turbin angin Savonius

b. Profil Plat Pengganggu sebagai berikut

- Lebar (L) : 105,2 mm
- Sudut (Θ) : $0^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$
- Tinggi (j) : 300 mm
- Tebal (t) : 3 mm



Gambar 3.6 Skema plat datar pengganggu

3.3.4 Pelumas

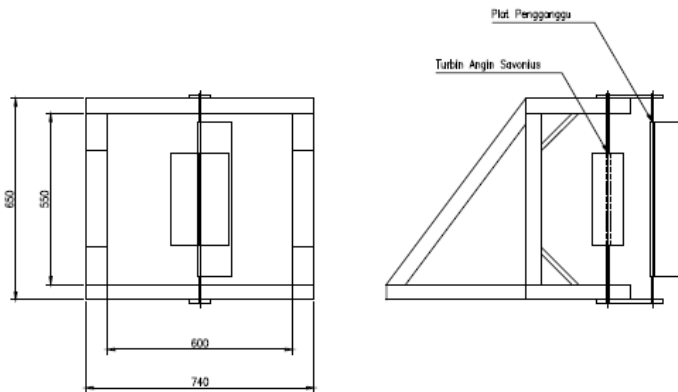
Pelumas pada penelitian ini digunakan untuk mengurangi gesekan pada bagian-bagian benda uji agar mengurangi kerugian yang terjadi. Pelumas yang digunakan yaitu **Rexco – 50** dengan *multipurpose lubricant*. Pemberian pelumas terutama digunakan untuk melumasi *bearing* yang digunakan pada turbin Savonius disetiap pengambilan data.



Gambar 3.7 Pelumas Rexco-50

3.3.5 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian digunakan sebuah penyangga yang digunakan sebagai tempat peletakkan turbin angin Savonius dan juga silinder pengganggu. Berikut skema dari penyangga turbin angin Savonius:



Gambar 3.8 Skema penyangga turbin angin Savonius

3.3.6 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (N.m) yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

a. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Tachometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Tachometer OMEGA seri HHT12** dengan kemampuan pembacaan 0,05 m sampai 7,6 m akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit.



Gambar 3.9 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3.3 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99,999 rpm
Accuracy	0,01% of reading or ± 1 digit
Resolution	0.001 to 1.0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 “AA” 1.5 Vdc batteries
Environmental	5 to 40° C

b. Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Tipe anemometer ini adalah *vane anemometer*. Anemometer yang digunakan ini merupakan **Anemometer OMEGA seri HHF141A** yang mampu mengukur kecepatan udara di kisaran 1,5 m/s – 35 m/s dengan akurasi $\pm 0,01$ atau $\pm 1\%$.

**Gambar 3.10** Anemometer OMEGA seri HHF141A

Tabel 3.4 Spesifikasi Omega HHF141A digital anemometer

Omega HHF-141A	
Probe Diameter	1 inch
Measurement Range	60 – 6800 ft/min 1,5– 35,00 m/s
Resolution	1 ft/min 0.01 m/s
Accuracy	$\pm(0,5\% \text{ FS} + 0,75\% \text{ reading} + 1 \text{ digit})$
Operating Temperature	Insturment: 0°C-15°C Probe: -20°C-100°C
Display	0,5 inch LCD with LED backlight, 4 Digits

c. Torsimeter

Torsimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur torsi suatu benda yang berputar. Torsimeter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan torsimeter digital **LUTRON Torque Meter Model: TQ-8800** *high resolution* dengan ketelitian 0,1 N.cm.



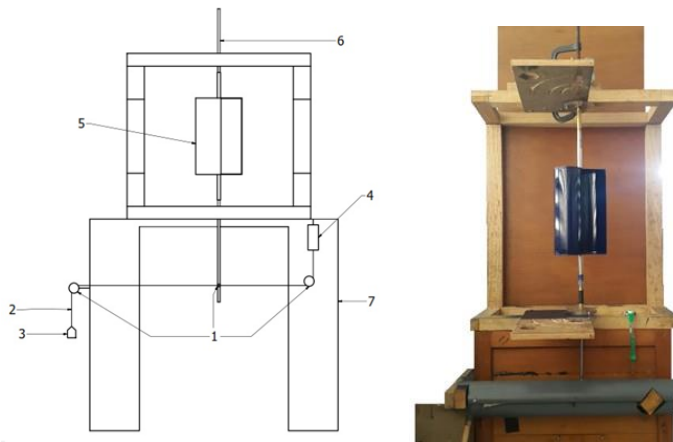
Gambar 3.11 Torsimeter digital merek LUTRON model TQ-8800

Tabel 3.5 Spesifikasi Torsimeter LUTRON model TQ-8800

Display Unit/ Resolution				
Unit	Max. range	High resolution	Low resolution	Over load protection range
kg-cm	15 kg-cm	0,01 kg-cm	0,1 kg-cm	22,5 kgf-cm max
Lb-inch	12,99 Lb-inch	0,01 Lb-inch	0,1 Lb-inch	19,53 Lbf-inch max
N-cm	147,1 N-cm	0,1 N-cm	1 N-cm	220,1 N-cm max

d. *Brake Dynamometer*

Brake dynamometer merupakan alat ukur manual yang berfungsi untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. *Brake dynamometer* yang digunakan didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**.

**Gambar 3.12** Susunan sistem *brake dynamometer*

Keterangan:

1. Sistem *pulley*
2. Benang Nilon
3. Massa pemberat

4. Pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur Penyanggah turbin angin Savonius

Pengukuran yang dilakukan adalah dengan skema yang terdiri dari sistem *pulley*, massa pemberat dan pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dengan merk Daml yang menyelubungi dari poros turbin angin Savonius. Besarnya daya yang terukur sesuai dengan persamaan perhitungan *Coefficient of power*, dimana torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dapat diukur oleh *brake dynamometer*. Torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius diukur ketika turbin berputar. Massa pemberat yang disambungkan dengan timbangan pegas ditambahkan secara bertahap dengan berbagai variasi hingga turbin berhenti berputar. Massa pemberat ditempatkan pada kotak akrilik agar tidak ada pengaruh angin pada massa pemberat yang mempengaruhi hasil dari harga torsi dinamis. Nilai torsi dinamis didapatkan dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang terbaca pada timbangan pegas dikalikan dengan jari-jari *disc* yang terpasang pada poros turbin Savonius.

Tabel 3.6 Spesifikasi timbangan pegas

SPECIFICATIONS	
Range	0 to 5 N ; 0 to 500 g
Resolution	1 N ; 10 g

Tabel 3.7 Spesifikasi benang nilon Daml

SPECIFICATIONS	
Kekuatan	20 lbs ; 9,1 kg
Diameter	0,45 mm



Gambar 3.13 Timbangan pegas

Dalam penelitian ini, sebagai massa pemberat dalam sistem *brake dynamometer* yang digunakan, massa pemberat menggunakan lilitan kawat seperti pada gambar 3.14. Untuk mengukur besarnya massa pemberat adalah dengan menggunakan timbangan. Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Shimadzu ELB300**. Untuk spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.8



Gambar 3.14 Massa Pemberat

Tabel 3.8 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300

SPECIFICATIONS	
Weighing Capacity	300 g
Minimum Display	0,01 g
Standard deviation	0,01 g
Linearity errors	$\pm 0,01$ g
Pan size	Ø 110 mm



Gambar 3.15 Timbangan Shimadzu ELB300

e. Multimeter

Multimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur besarnya voltase pada *voltage regulator*. Agar pada keluaran *voltage regulator* dapat diketahui besar voltasenya tetap terjaga konstan. Multimeter yang digunakan dalam penelitian ini adalah **SANWA PC7000 Digital Multimeter**.



Gambar 3.16 SANWA PC7000 Digital Multimeter

Tabel 3.9 Spesifikasi Multimeter Digital SANWA PC7000

SPECIFICATIONS	
Measurement Type	ACV
Range	500 mV – 1000 mV
Best Accuracy	$\pm(0,5\%+40)$
Resolution	0,01 mV
Input Impedance	10 M Ω
Size	184 x 86 x 52 mm

3.4 Prosedur Penelitian

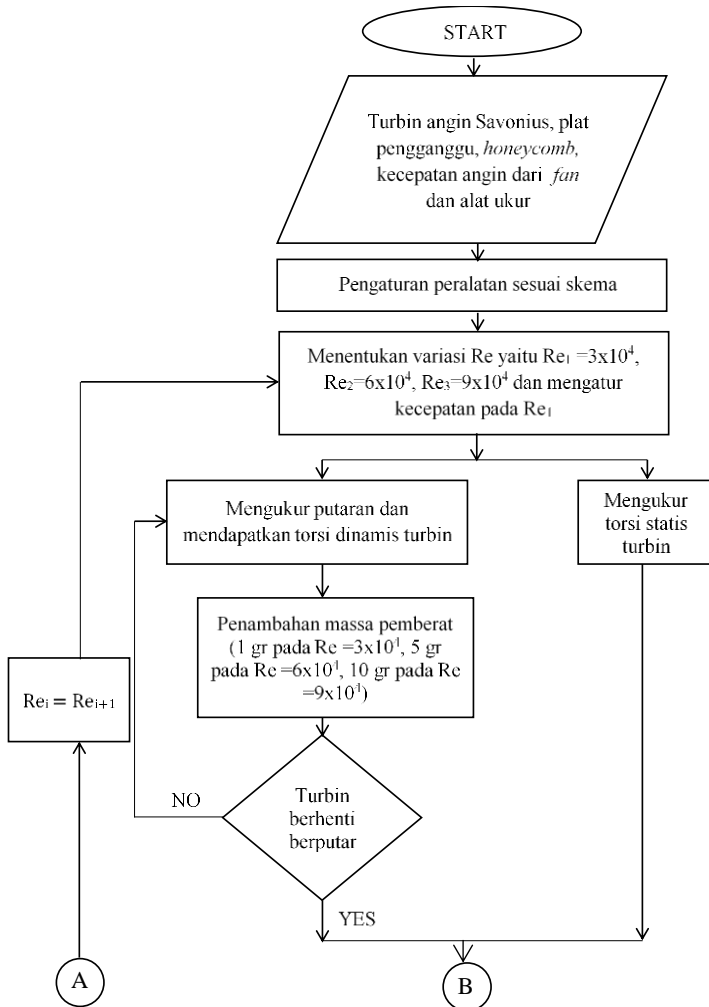
Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

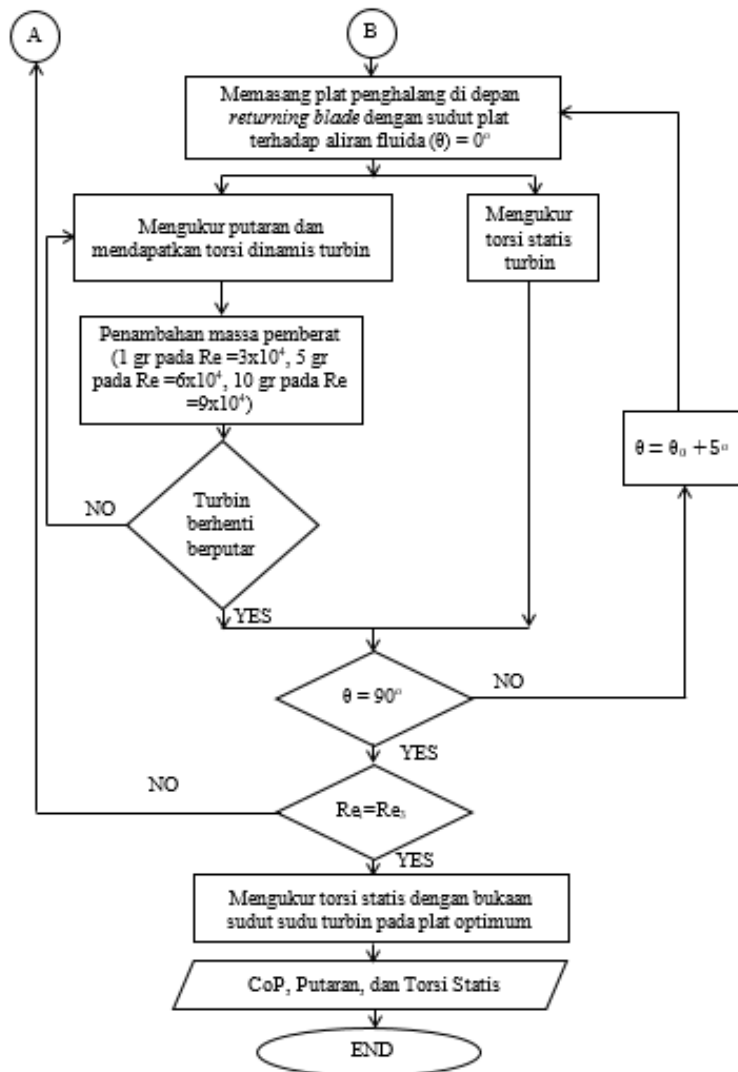
1. Memasang benda uji berupa turbin Savonius pada bagian depan *fan*.
2. Menyalakan *fan* dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai dengan yang diharapkan.
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan termometer.
4. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk mendapatkan Reynolds *Number* yang diinginkan, yaitu 3×10^4 .
5. Setelah mendapatkan bilangan Reynolds dan *steady*, melakukan pengukuran terhadap putaran poros dengan menggunakan tachometer yang ditembakkan pada poros turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak.
6. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius dengan langkah sebagai berikut:
 - a. Menambahkan massa pemberat (1 gram) yang disambungkan dengan timbangan pegas.
 - b. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas.
 - c. Mengukur putaran turbin Savonius menggunakan tachometer.

- d. Menghitung nilai torsi dinamis yang didapatkan dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang dihasilkan pada timbangan pegas dikalikan dengan jari-jari *disc* yang terpasang pada poros turbin Savonius.
- e. Mengulangi langkah a sampai d hingga turbin Savonius berhenti berputar.
- f. Memilih nilai CoP maximum yang dihasilkan dari perkalian antara torsi dinamis dengan putaran turbin dengan kondisi beban yang sama.
7. Melakukan pengukuran torsi statis dengan torsimeter.
8. Mengulangi langkah 2 sampai 7 dengan variasi bilangan Reynolds 6×10^4 dengan penambahan massa pemberat (5 gram).
9. Mengulangi langkah 2 sampai 7 dengan variasi bilangan Reynolds 9×10^4 dengan penambahan massa pemberat (10 gram).
10. Memasang plat pengganggu di depan *returning blade* dengan ($L/D = 1,035$).
11. Mengulangi langkah 2 sampai 10 dengan memvariasikan sudut plat pengganggu sebesar $0^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$ dengan kenaikan sudut 5° .
12. Setelah mengetahui sudut bukaan optimum plat pengganggu, melakukan pengukuran torsi statis dengan bukaan sudut sudu turbin sebesar $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan sudut 5° .
13. Mematikan *fan*.
14. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik torsi statis terhadap L/D, putaran terhadap L/D, dan *Coefficient of Power (CoP)* terhadap L/D.
15. Membandingkan hasil data yang diperoleh antara turbin angin Savonius berpengganggu dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

3.5 Flowchart Penelitian

Urutan langkah pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :





Gambar 3.17 Flowchart pengambilan data

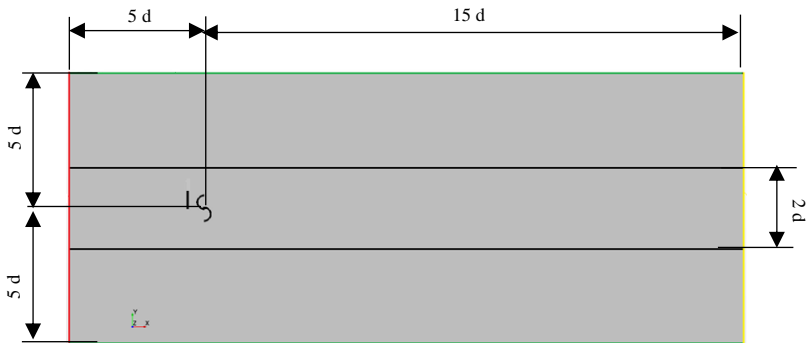
3.6 Prosedur Simulasi

Simulasi menggunakan *software* STAR-CCM+ dengan *static domain*. Simulasi dengan menggunakan metode numerik mempunyai tiga tahapan utama yaitu *Pre Processing*, *Processing*, dan *Post Processing*.

3.6.1 Tahap *Pre Processing*

a. Pembuatan Geometri dan *Meshing*

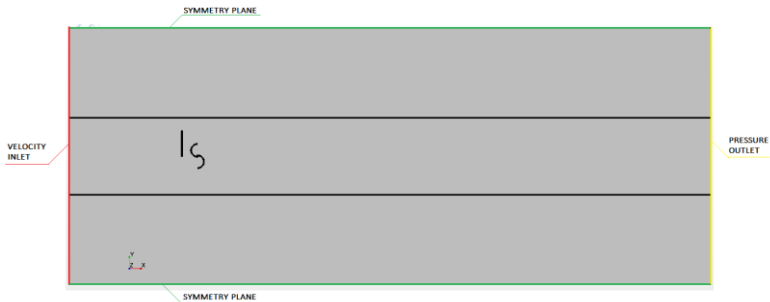
Membuat geometri turbin angin Savonius dua sudu. Panjang karakteristik turbin ($d = 190,2 \text{ mm}$) menjadi acuan pada pembuatan geometri. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *tetrahedral mesh* dengan operasi *automated mesh*.



Gambar 3.18 Dimensi turbin Savonius

b. *Boundary Condition*

Boundary Condition adalah penentuan batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji dengan menetapkan *inlet*, *outlet*, *wall*, *interface*, dan lain-lain pada geometri yang telah dibuat seperti pada gambar 3.19.



Gambar 3.19 *Boundary condition* turbin angin Savonius

c. Parameter Model

Pada langkah ini pemodelan aliran yang akan digunakan adalah *segregated flow* dengan *turbulence modelling* k-epsilon *realizable*, di mana model ini dipilih karena memiliki cakupan aplikasi yang luas dan umum digunakan, serta parameter *implicit unsteady* dipilih dengan skema diskretisasi *second order upwind*.

Pemodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan *density* $1,1729 \text{ kg/m}^3$ (*constant*) dan *dynamic viscosity* $1.852\text{E-}5 \text{ Pa.s}$ (*constant*).

3.6.2 Tahap Processing

Pada tahap *processing*, parameter-parameter yang telah ditetapkan pada saat *pre processing* akan diiterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan. Jika kriteria konvergensi tercapai, maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi tidak tercapai maka langkah kembali ke tahap pembuatan *meshing*.

3.6.3 Tahap Post Processing

Setelah diperoleh solusi numerik dari tahap *processing*, tahap berikutnya adalah tahap *post processing*, yaitu menganalisis dan memvisualisasikan hasil dari solusi numerik tersebut. Pada tahap ini akan diperoleh data berupa visualisasi aliran, yaitu vektor kecepatan dan kontur tekanan.

3.7 Urutan Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan rincian pelaksanaan sesuai tabel 3.10.

Tabel 3.10 *Table planner* penelitian

No	Kegiatan	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1	Studi Literatur								
2	Persiapan Alat Uji								
3	Setting Alat Ukur								
4	Penulisan Proposal TA								
5	Pengambilan Data								
6	Ujian Proposal TA								
7	Penulisan Laporan TA								
8	Ujian TA								

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab 4 ini berisi tentang analisa dan pembahasan terhadap data hasil eksperimen pada turbin Savonius dengan atau tanpa menggunakan plat datar pengganggu dalam upaya peningkatan performa dari turbin Savonius sendiri.

4.1 Contoh Perhitungan

4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

✓ massa jenis udara (ρ)

Dari persamaan gas ideal dengan rumus $\rho = \frac{m}{V}$, maka didapatkan bahwa :

$$P V = m R T$$

$$\frac{P V}{m} = R T$$

$$\frac{P}{\rho} = R T$$

$$\rho = \frac{P}{R T} \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana :

P = tekanan absolut udara pada saat keadaan standar = $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

V = volume udara pada pengujian

m = massa udara pada saat pengujian

R = *universal gas constant* = 287 Nm/kg K

T = temperatur udara ruangan = 301 K

ρ = massa jenis udara pada saat pengujian

sehingga:

$$\rho = \frac{P}{R.T}$$

$$\rho = \frac{101325 \frac{N}{m^2}}{287 \frac{Nm}{kgK} \cdot 301K} = 1,1729 \frac{kg}{m^3}$$

✓ **viskositas absolut udara (μ)**

Untuk perhitungan viskositas absolut udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu = \frac{b \times (T)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T}} \dots\dots\dots(4.2)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \text{ Kg/m.s.K}^{0,5}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

sehingga:

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (301K)^{0,5}}{1 + \frac{110,4K}{301K}} = 1,852 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

✓ **kecepatan aliran fluida**

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan fluida :

$$U_{\infty} = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D} = \frac{60000 \times 1,852 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{1,1729 \frac{kg}{m^3} \times 0,1902m} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$U_{\infty} = 4,96 \frac{m}{s}$$

4.1.2 Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*

Sebagai contoh perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* ini, maka diambil data hasil pengukuran pada bilangan Reynolds 6×10^4 . Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* didapatkan dari persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$CoP = \frac{P_r}{P_w} \dots\dots\dots(4.4)$$

P_T didapatkan dari daya mekanis rotor turbin yang dihitung menggunakan sistem *rope brake dynamometer* yang diputar oleh poros turbin. Adapun nilai P_T tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$P_T = \frac{(m-s)g r \pi n}{30} \dots\dots\dots(4.5)$$

dimana :

- m = massa pemberat (kg)
- s = pegas yang terbaca (kg)
- g = akselerasi gravitasi (m/s^2)
- r = radius *pulley* (m)
- n = gerak rotasi poros turbin angin Savonius (rpm)

Sedangkan daya teoritis (P_w) didapatkan dari energi aliran angin sesuai dengan persamaan 2.11 sebagai berikut :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3 \dots\dots\dots(4.6)$$

dimana :

ρ = massa jenis aliran fluida (kg/m^3)

A = luas penampang turbin (m^2)

U = kecepatan aliran fluida (m/s)

Pada penelitian ini besar luasan A ditentukan sebagai,

$$\begin{aligned} A &= (2D-b) \times H \\ &= (2(0,1016 \text{ m}) - 0,013 \text{ m}) \times 0,3 \text{ m} \\ &= 5,706 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Maka nilai dari *Coefficient of Power (CoP)* pada pengukuran bilangan Reynolds 6×10^4 dan besar $\theta = 15^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$CoP = \frac{P_T}{P_w}$$

$$CoP = \frac{\frac{|m - s|gr \pi n}{30}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3}$$

$$\begin{aligned} CoP &= \frac{|0,035 \text{ kg} - 0,155 \text{ kg}| \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,0105 \text{ m} \times \pi \times 227,72 \text{ rpm}}{30} \\ &= \frac{\frac{1}{2} \times 1,1729 \frac{kg}{m^3} \times 0,057 \text{ m}^2 \times (4,96 \frac{m}{s})^3}{30} \\ &= 0,0719 \\ &= 7,19 \% \end{aligned}$$

4.1.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio (TSR)*

Sebagai contoh perhitungan *Tip Speed Ratio (TSR)*, maka diambil data hasil pengukuran pada bilangan Reynolds 6×10^4 . Perhitungan *Tip Speed Ratio (TSR)* didapatkan dari persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$TSR = \frac{\omega R}{U} \dots \dots \dots (4.7)$$

dimana :

TSR = *tip speed ratio*

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

R = jari-jari turbin (m)

U = kecepatan angin (m/s)

Sehingga nilai *Tip Speed Ratio (TSR)* pada pengukuran bilangan Reynolds 6×10^4 dan besar $\theta = 15^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$TSR = \frac{\frac{2\pi}{60} \cdot 227,72 \times \frac{0,1902}{2} \text{ m}}{4,96 \text{ m/s}}$$

$$TSR = 0,46$$

4.1.4 Perhitungan *Error* Eksperimen (ε)

Sebagai contoh perhitungan *error* eksperimen (ε), maka diambil data hasil pengukuran torsi statis (T) dengan plat pengganggu pada bilangan Reynolds 9×10^4 saat $\theta = 15^\circ$. Perhitungan *error* eksperimen (ε) didapatkan dari persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_t} \times 100\% \dots \dots \dots (4.8)$$

$$\frac{|T_t - T_R|}{T_t} \times 100\%$$

dimana:

ε = *error* eksperimen

ΔT = selisih antara torsi statis pengukuran dengan torsi statis perhitungan (N.cm)

T_R = torsi statis pengukuran (N.cm) = 9,29 N.cm

T_t = torsi statis perhitungan (N.cm)

Nilai T_R didapatkan melalui pengukuran menggunakan *torquemeter*, sedangkan T_t didapatkan melalui perhitungan teoritis selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dengan *returning blade* yang kemudian dikalikan dengan jari-jari turbin. Adapun nilai T_t tersebut dapat dihitung sebagai berikut

$$T_t = (F_{D1} - F_{D2})R \quad (4.9)$$

dimana:

F_{D1} = gaya *drag* pada *advancing blade* (N)

F_{D2} = gaya *drag* pada *returning blade* (N)

Sehingga nilai T_t pada pengukuran dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot (C_{D1} - C_{D2}) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R$$

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot (2,3 - 1,2) \cdot 1,1772 \frac{kg}{m^3} \cdot (7,45 \text{ m/s})^2 \cdot (0,1016 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}) \cdot (\frac{0,1902}{2} \text{ m})$$

$$T_t = 0,104 \text{ N} \cdot \text{m} = 10,4 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Sehingga nilai *error* eksperimen (ε) pada pengukuran dapat dihitung sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{|T_t - T_R|}{T_t} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{|10,4 - 9,29|}{10,4} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 10,67\%$$

Dengan melihat nilai *error* eksperimen yang terjadi yaitu sebesar 10,67% dapat dikatakan bahwa data pengukuran sudah baik, dikarenakan dalam perhitungan untuk *losses* yang terjadi masih diabaikan.

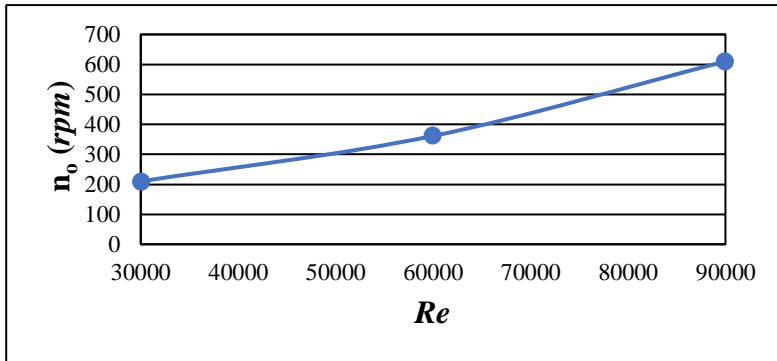
4.2 Analisis Performa Turbin Savonius Tanpa Plat Datar Pengganggu dengan Bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4

Pada penelitian kali ini akan dilakukan upaya dalam kenaikan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan pengganggu berupa sebuah plat datar yang berbentuk persegi di depan *returning blade* turbin angin. Plat datar tersebut dipasang dengan sudut kemiringan antara 0° sampai dengan 90° pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 .

Sebelum diberikan sebuah pengganggu, maka terlebih dahulu dilakukan pengukuran terhadap performa turbin angin Savonius tanpa diberikan sebuah pengganggu agar hasil datanya dapat dilakukan sebuah analisa komparasi. Adapun parameter-parameter yang diukur meliputi putaran turbin Savonius (n_o), torsi statis (T_o), dan torsi dinamis untuk menghitung *coefficient of power* (CoP_o). Data dari eksperimen turbin Savonius tanpa menggunakan plat datar pengganggu dapat disajikan dalam beberapa pembahasan sebagai berikut.

4.2.1 Putaran Turbin Savonius (n_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa putaran turbin Savonius (n_o) pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran putaran turbin angin Savonius tanpa diberikan sebuah pengganggu dilakukan pada temperatur sebesar 28°C dengan menggunakan *tachometer* yang ditembakkan pada poros turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut.

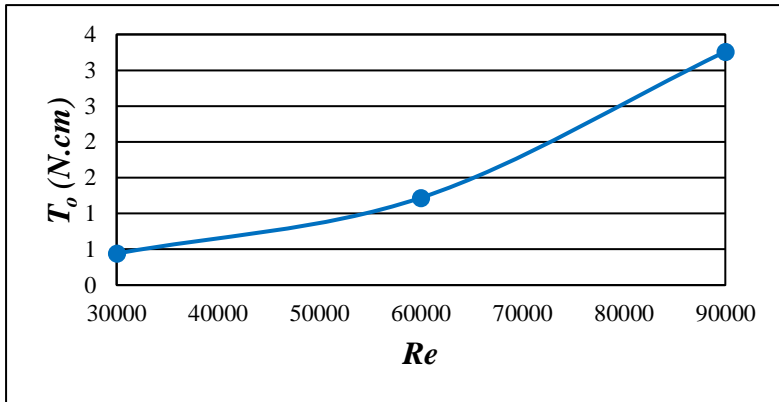


Gambar 4.1 Grafik putaran turbin Savonius (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Berdasarkan pada gambar 4.1 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan putaran turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds. Putaran yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Terlihat bahwa pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 210 rpm, 361,45 rpm, dan 610 rpm. Adapun terjadinya peningkatan putaran yang dihasilkan turbin Savonius disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Hal tersebut akan menyebabkan nilai dari *mass flow rate* yang mengenai turbin semakin besar sehingga putaran dari turbin akan kian meningkat.

4.2.2 Torsi Statis (T_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T_o) turbin Savonius pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan sebuah pengganggu dilakukan pada temperatur sebesar 28°C dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut.

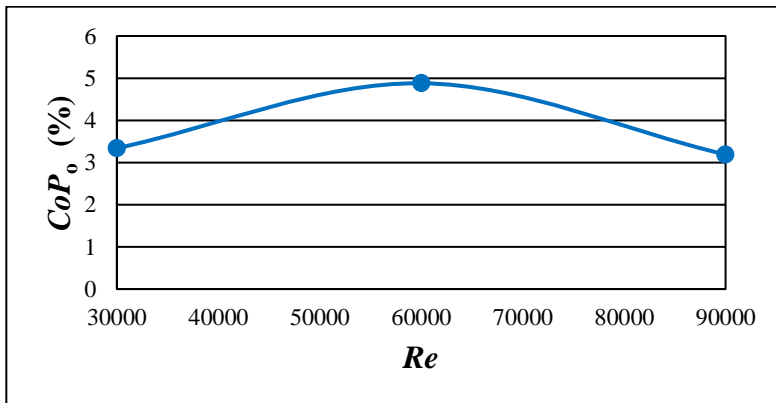


Gambar 4.2 Grafik torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Berdasarkan pada gambar 4.2 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan torsi statis dari turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds. Torsi statis yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Terlihat bahwa pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T_o) maksimal sebesar 0,44 N.cm, 1,22 N.cm, dan 3,26 N.cm. Terjadinya peningkatan torsi statis yang dihasilkan turbin Savonius disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Hal tersebut menyebabkan nilai dari gaya *drag* yang di dalamnya terikat pada variabel kecepatan udara akan semakin besar sehingga torsi yang dibangkitkan juga kian meningkat. Torsi statis yang semakin besar pada bilangan Reynolds yang semakin besar menandakan bahwa semakin besar kecepatan aliran udara maka semakin besar energi angin yang dikonversikan menjadi torsi statis turbin angin Savonius.

4.2.3 *Coefficient of Power (CoP_o)* sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (*Re*)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power (CoP_o)* pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin Savonius tanpa diberikan sebuah pengganggu dilakukan pada temperatur sebesar 28°C . Daya *output* dari turbin angin Savonius didapatkan dari pengukuran torsi dinamis yang menggunakan *rope brake dynamometer*. Daya *output* akan dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut

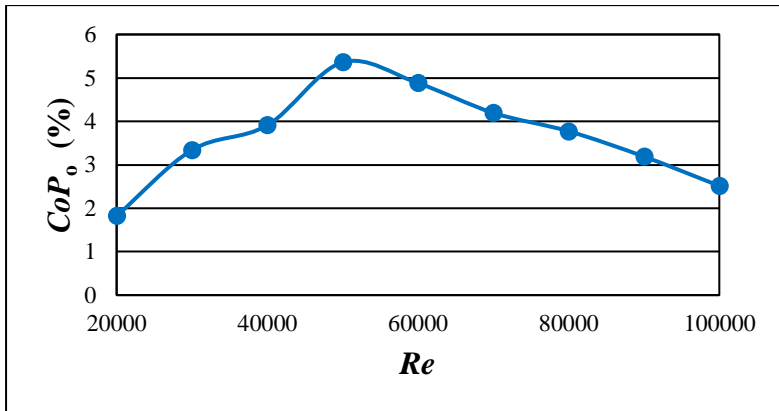


Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power (CoP_o)* sebagai fungsi bilangan Reynolds (*Re*)

Berdasarkan pada gambar 4.3 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan *Coefficient of Power (CoP_o)* dari turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds. *Coefficient of Power (CoP_o)* yang dihasilkan oleh turbin Savonius mempunyai *peak point* pada bilangan Reynolds 6×10^4 . Terlihat bahwa pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power (CoP_o)* sebesar 3,34%,

4,88%, dan 3,19%. Terjadinya *peak point* untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP_o) yang dihasilkan turbin Savonius disebabkan oleh perbandingan antara daya *output* dari turbin terhadap daya *input* dari angin pada setiap bilangan Reynolds mempunyai nilai efisiensi yang berbeda. Hal tersebut menandakan bahwa pada bilangan Reynolds 6×10^4 mempunyai efisiensi turbin yang paling tinggi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa turbin Savonius yang digunakan memiliki bilangan Reynolds optimum untuk mengkonversi energi *input* dari aliran udara menjadi daya *output*, yaitu pada $Re = 6 \times 10^4$.

Berikut merupakan gambar 4.4 yang menjelaskan mengenai letak nilai optimum CoP_o yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari rentang Reynolds Number 2×10^4 sampai 1×10^5 , dengan kenaikan setiap bilangan Reynolds 1×10^4 .



Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Pada penelitian kali ini digunakan variasi bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Sedangkan pada gambar 4.4, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP) akan cenderung naik dari bilangan Reynolds 2×10^4 hingga bilangan Reynolds optimum terjadi pada $Re = 5 \times 10^4$ yang menghasilkan

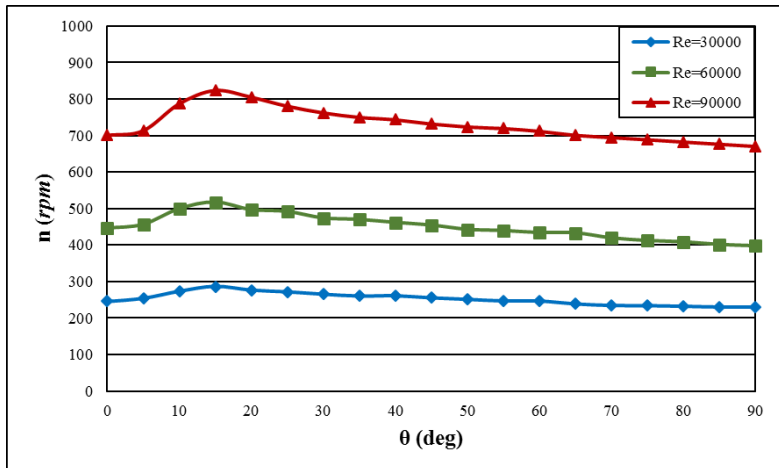
CoP_o maksimum sebesar 5,36%. Setelah itu untuk $Re > 5 \times 10^4$ nilai CoP cenderung mengalami penurunan. Dalam hal ini nilai bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai nilai maksimum di $Re = 6 \times 10^4$.

4.3 Analisis Performa Turbin Savonius yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ pada Bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4

Adapun studi eksperimental kali ini dilakukan optimisasi performa dari turbin angin tipe Savonius dengan diberikan sebuah plat datar pengganggu berbentuk persegi panjang dengan nilai $L/D = 1,035$ diletakkan di depan *returning blade* turbin Savonius dengan variasi perubahan sudut (θ). Sudut penempatan plat datar pengganggu divariasikan dari 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 .

4.3.1 Putaran Turbin Savonius (n) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa putaran turbin Savonius (n) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran putaran turbin Savonius (n) dilakukan dengan menggunakan tachometer yang ditembakkan pada poros turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.5 Grafik putaran turbin Savonius (n) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

Berdasarkan pada gambar 4.5 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan putaran yang dihasilkan oleh turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu. Putaran yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dan setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan putaran turbin Savonius yang kemudian berangsur mengalami penurunan.

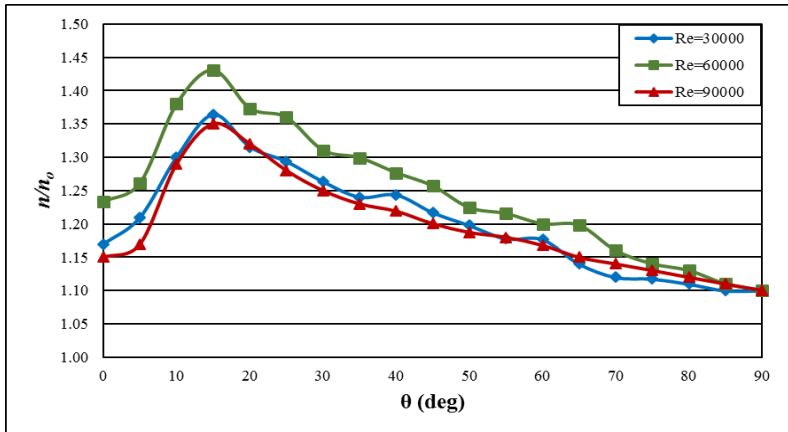
Pada gambar 4.5 terlihat bahwa putaran turbin tipe Savonius akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 15° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , putaran awal dari turbin Savonius sebesar 245,7 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan putaran turbin sebesar 286,36 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 231 rpm pada sudut 90° .

Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , putaran awal dari turbin Savonius sebesar 445,73 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan putaran turbin sebesar 517,15 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 397,6 rpm pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , putaran awal dari turbin Savonius sebesar 701,5 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan putaran turbin sebesar 823,5 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 671,25 rpm pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 15° terjadi kenaikan putaran dari turbin angin Savonius. Hal ini diduga karena posisi sudut penempatan plat datar pengganggu yang menghalangi *returning blade* menyebabkan terjadinya fenomena penurunan gaya *drag* pada *returning blade*, di sisi lain arah plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih terarah sehingga selisih torsi dari kedua sudu meningkat dan terjadi kenaikan putaran dari turbin angin Savonius. Sedangkan pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 15° hingga 90° terjadi penurunan putaran dari turbin angin Savonius yang disebabkan oleh variasi bukaan sudut plat datar pengganggu yang semakin besar sehingga menyebabkan aliran udara menuju *advancing blade* tidak terarah dan bergeser terhadap pusat kerja gaya *drag* pada *advancing blade*. Selain itu pada $\theta > 15^\circ$ terjadi peningkatan gaya *drag* pada *returning blade* dikarenakan oleh posisi bukaan sudut plat pengganggu yang mulai tidak menghalangi bagian *returning blade*, sehingga aliran fluida dapat menabrak sudu tersebut dan mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil.

Dari data sebelumnya pada turbin Savonius yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan Reynolds 3×10^4 ,

6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 210 rpm, 361,45 rpm, dan 610 rpm. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin Savonius yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut



Gambar 4.6 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

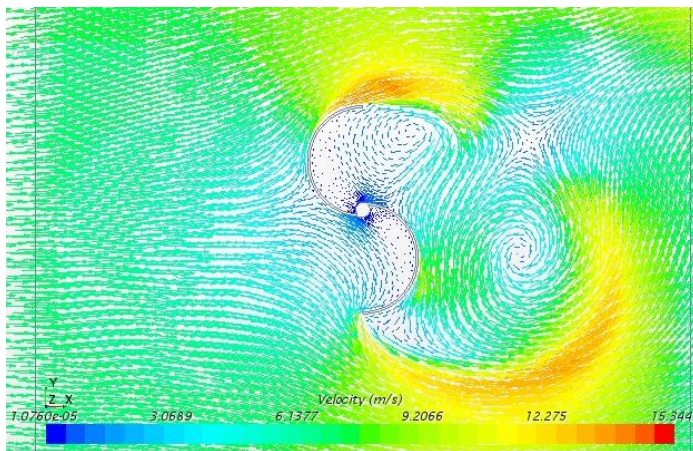
Pada gambar 4.6 terlihat bahwa perbandingan putaran turbin tipe Savonius (n/n_o) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 15° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , perbandingan putaran turbin tipe Savonius (n/n_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,17 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,36 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,1 kali lipat pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , perbandingan putaran turbin tipe Savonius (n/n_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,23 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu

sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,43 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,1 kali lipat pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , perbandingan putaran turbin tipe Savonius (n/n_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,15 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,35 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,1 kali lipat pada sudut 90° .

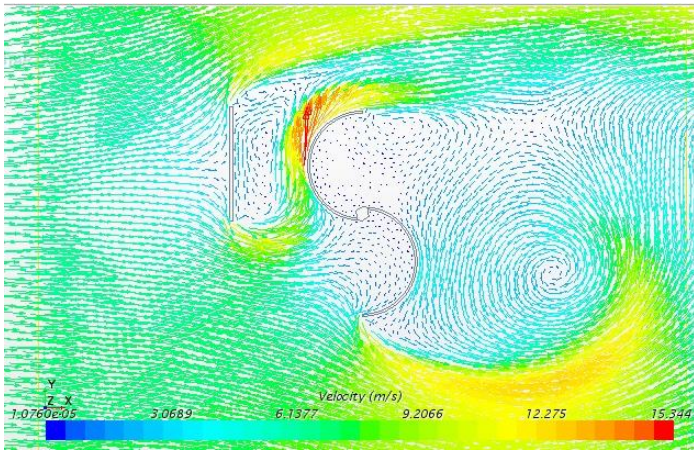
Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan Reynolds dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) memiliki nilai $n/n_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius dapat meningkatkan performa dari turbin Savonius. Kenaikan putaran turbin Savonius dapat ditunjukkan pada simulasi yang dilakukan menggunakan aliran udara dengan bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ yang dialirkan pada turbin angin Savonius tanpa plat pengganggu dan turbin angin Savonius yang diberikan plat pengganggu pada posisi sudut bukaan 0° dan 15° di depan *returning blade*. Simulasi dilakukan menggunakan *software* STAR CCM+ dengan metode *turbulence modelling* k-epsilon *turbulent*, parameter *implicit unsteady* dipilih dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Pada gambar 4.7 terlihat perbedaan vektor kecepatan pada turbin angin Savonius tanpa plat pengganggu dan turbin angin Savonius yang diberikan plat pengganggu pada posisi sudut bukaan 0° dan 15° . Turbin angin Savonius dapat berputar karena adanya perbedaan kecepatan yang mengakibatkan perbedaan tekanan. Besar kecepatan berbanding terbalik dengan besar tekanan dimana tekanan di depan *returning blade* lebih rendah akibat adanya plat pengganggu posisi 0° sehingga perbedaan tekanan antara sisi depan *returning blade* dan sisi belakang *returning blade* turun. Berkurangnya tekanan

menandakan bahwa gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga berkurang yang mengakibatkan selisih gaya *drag* kedua sudu turbin akan meningkat yang akan meningkatkan torsi yang dihasilkan oleh turbin. Sehingga putaran turbin Savonius meningkat dibandingkan tanpa menggunakan plat.

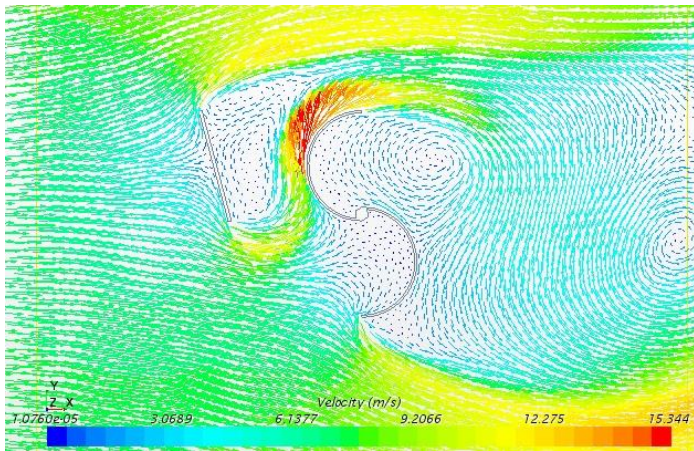
Peningkatan kecepatan terbesar di depan *returning blade* terjadi pada posisi sudut bukaan 15° . Pada posisi ini, menjadikan tekanan di depan *returning blade* lebih turun lagi dan sisi belakang *returning blade* justru meningkat, akibatnya ada gaya *drag* dari belakang *returning blade* sehingga putaran turbin lebih meningkat lagi dibandingkan dengan plat pengganggu posisi 0° . Gambar 4.7 menunjukkan adanya fenomena aliran yang terjadi pada turbin untuk konfigurasi tanpa plat datar pengganggu dan dengan adanya plat datar pengganggu di depan *returning blade* yang mana hal ini membuktikan terjadinya kenaikan performa turbin dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade*. Sedangkan pada gambar 4.8 menunjukkan kontur tekanan yang terjadi di turbin Savonius tanpa plat pengganggu dan turbin angin Savonius yang diberikan plat pengganggu pada posisi sudut bukaan 0° dan 15° .



(a)

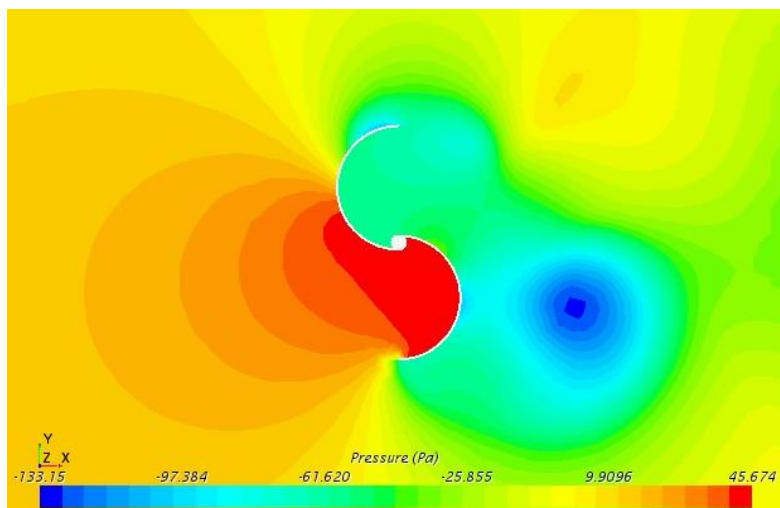


(b)

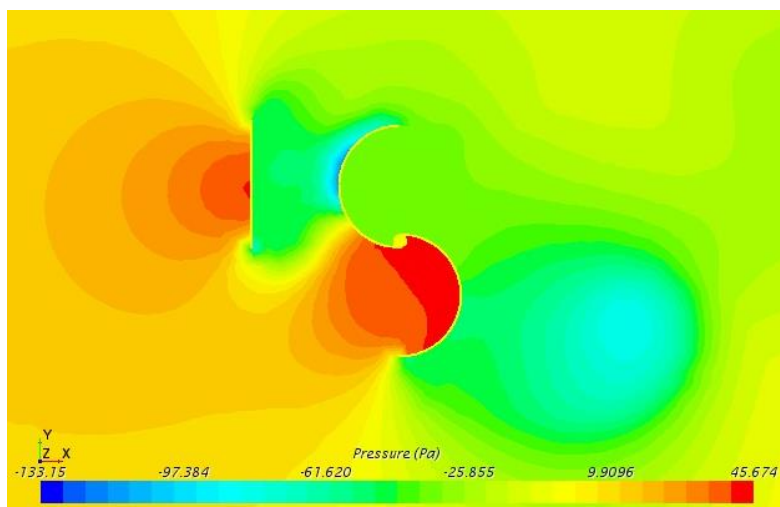


(c)

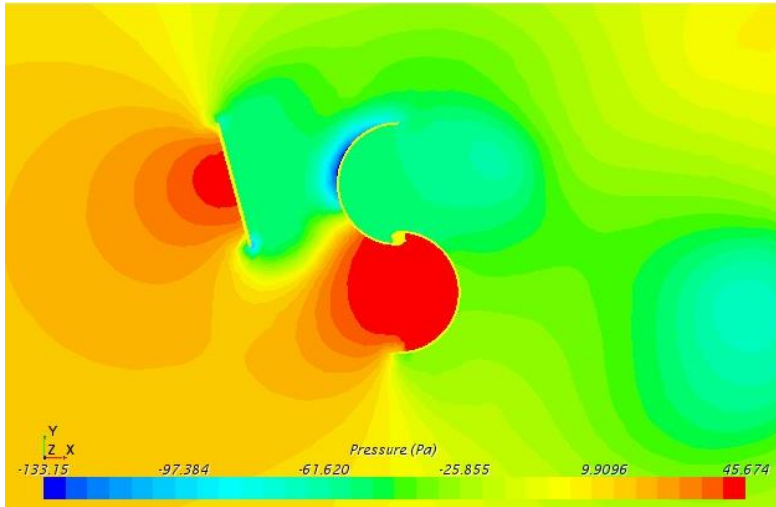
Gambar 4.7 Vektor kecepatan hasil simulasi turbin angin Savonius (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 0^\circ$ (c) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 15^\circ$



(a)



(b)

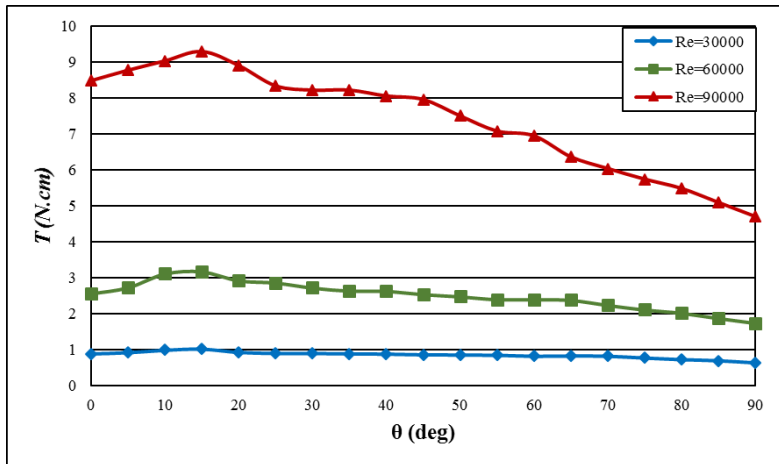


(c)

Gambar 4.8 Kontur tekanan hasil simulasi turbin angin Savonius
 (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut
 bukaan $\theta = 0^\circ$ (c) plat datar pengganggu sudut bukaan $\theta = 15^\circ$

4.3.2 Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran torsi statis (T) dari turbin angin Savonius dilakukan dengan menahan sudu turbin pada sudut 0° dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut.



Gambar 4.9 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

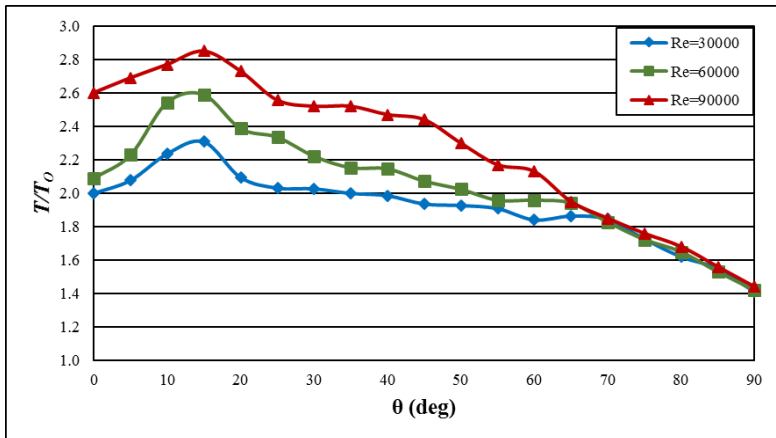
Berdasarkan pada gambar 4.9 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu. Torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dan setiap *trendline* menunjukkan adanya kenaikan torsi statis (T) seiring bertambahnya bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu sampai mencapai maximum pada sudut optimum tertentu kemudian berangsur mengalami penurunan.

Pada gambar 4.9 terlihat bahwa torsi statis turbin tipe Savonius tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 15° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , torsi statis awal dari turbin Savonius sebesar $0,88 \text{ N.cm}$ pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan torsi statis turbin sebesar $1,02$

N.cm dan selanjutnya torsi statis dari turbin akan menurun hingga 0,62 N.cm pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , torsi statis awal dari turbin Savonius sebesar 2,55 N.cm pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan torsi statis turbin sebesar 3,16 N.cm dan selanjutnya torsi statis dari turbin akan menurun hingga 1,73 N.cm pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , torsi statis awal dari turbin Savonius sebesar 8,48 N.cm pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan torsi statis turbin sebesar 9,29 N.cm dan selanjutnya torsi statis dari turbin akan menurun hingga 4,69 N.cm pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 15° terjadi kenaikan torsi statis dari turbin angin Savonius. Hal ini diduga karena torsi statis dipengaruhi oleh selisih gaya *drag* pada *advancing* dan *returning blade*. Posisi sudut penempatan plat datar pengganggu yang menghalangi *returning blade* menyebabkan terjadinya fenomena peningkatan selisih gaya *drag* pada kedua sudu, sehingga torsi statis meningkat hingga bukaan sudut optimum plat pengganggu. Adapun pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 15° hingga 90° terjadi fenomena penurunan torsi statis (T) dari turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan oleh variasi sudut plat datar pengganggu yang semakin besar dan akan menyebabkan titik pusat gaya pada bagian *advancing blade* turbin Savonius mengalami perpindahan semakin menuju ke pusat sumbu turbin. Selain itu, variasi sudut plat datar pengganggu yang semakin besar juga menyebabkan adanya aliran fluida atau angin yang perlahan melewati celah antara plat datar pengganggu dengan sisi *returning blade* turbin Savonius sehingga terdapat peningkatan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Hal tersebut berakibat pada selisih gaya *drag* yang dihasilkan dari kedua buah sudu semakin kecil dan selisih torsi akan berangsur-angsur mengalami penurunan.

Dari data sebelumnya pada turbin Savonius yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T) maksimal sebesar $0,44 \text{ N.cm}$, $1,22 \text{ N.cm}$, dan $3,26 \text{ N.cm}$. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin Savonius yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut



Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

Pada gambar 4.10 terlihat bahwa perbandingan torsi statis (T/T_0) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 15° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) awal dari turbin Savonius sebesar 2 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan torsi statis sebesar 2,31 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,41 kali lipat pada

sudut 90° . Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_o) awal dari turbin Savonius sebesar 2,09 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan torsi statis sebesar 2,59 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,42 kali lipat pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_o) awal dari turbin Savonius sebesar 2,6 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan torsi statis turbin sebesar 2,85 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,44 kali lipat pada sudut 90° .

Terdapat fenomena bahwa pada posisi $\theta \geq 70^\circ$ nilai dari perbandingan torsi statis (T/T_o) dari turbin Savonius hampir sama untuk seluruh variasi bilangan Reynolds. Posisi plat pengganggu yang membentuk sudut tersebut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *returning blade* menjadi lebih banyak yang menyebabkan terjadinya penurunan selisih gaya *drag* pada kedua sudu jika dibandingkan dengan sudut bukaan sebelumnya. Hal tersebut yang melandasi pada posisi $\theta \geq 70^\circ$, perbandingan selisih gaya *drag* pada kedua sudu turbin pada seluruh bilangan Reynolds memiliki harga yang hampir sama. Sehingga, selisih torsi yang dihasilkanpun mengalami peningkatan yang hampir sama. Selain itu, pada saat posisi $\theta \geq 70^\circ$ juga menunjukkan bahwa pada $Re = 9 \times 10^4$ memiliki performa yang lebih baik dari variasi bilangan Reynolds yang lain.

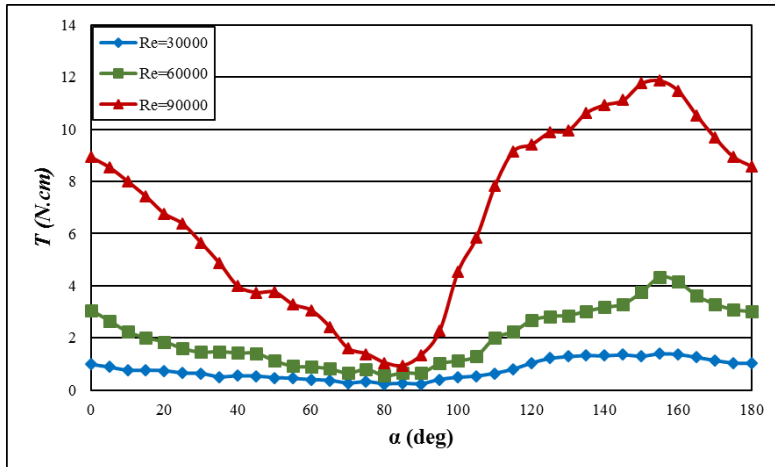
Adapun pada sudut penempatan plat datar pengganggu pada posisi 90° didapatkan nilai $T/T_o > 1$. Hal ini diduga karena adanya pola perilaku aliran setelah melewati plat akan membentuk daerah *wake* di sisi *upstream returning blade* yang diakibatkan dari poros engsel pengganggu yang mempunyai ketebalan 1 cm. Daerah *wake* tersebut akan menyebabkan tekanan di sisi *upstream returning blade* akan menurun, sehingga gaya *drag* pada sisi *upstream*

returning blade juga akan lebih kecil dibandingkan dengan tanpa menggunakan plat pengganggu. Selisih gaya *drag* dari kedua sudu turbin Savonius yang dihasilkan juga meningkat sehingga torsi statis yang terukur juga lebih tinggi.

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan Reynolds dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) memiliki nilai $T/T_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius dapat meningkatkan performa dari turbin Savonius.

4.3.3 Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Bukaannya Sudu Turbin (α)

Pada gambar 4.11 menunjukkan grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan plat pengganggu. Pengukuran torsi statis dilakukan dengan kondisi turbin angin dalam keadaan tidak berputar. Grafik yang ditampilkan merupakan nilai torsi statis sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin pada sudut plat pengganggu $\theta = 15^\circ$. Penelitian dilakukan dengan bukaan sudu sudu dalam rentang 0° hingga 180° dengan kenaikan setiap 5° .



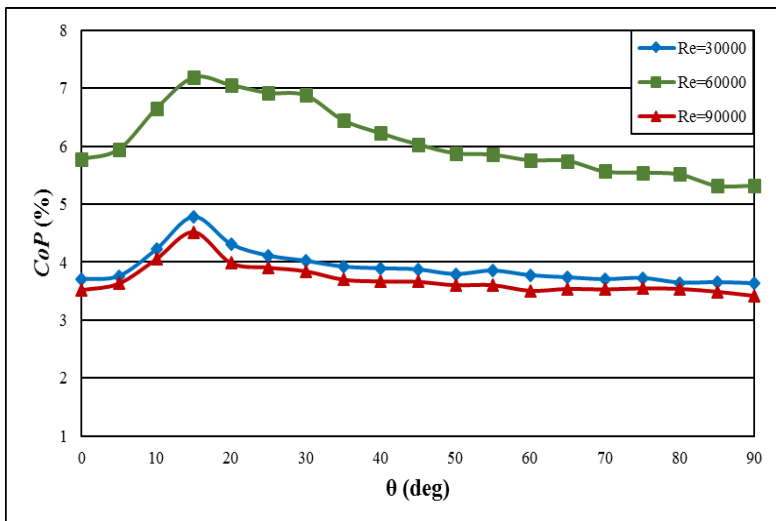
Gambar 4.11 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin (α)

Pada gambar 4.11 didapatkan pada $Re = 3 \times 10^4$, nilai torsi statis maksimum didapatkan pada $\alpha = 155^\circ$ yaitu sebesar 1,4 N.cm dan nilai torsi statis minimum didapatkan pada $\alpha = 90^\circ$ yaitu sebesar 0,23 N.cm. Pada $Re = 6 \times 10^4$, nilai torsi statis maksimum didapatkan pada $\alpha = 155^\circ$ yaitu sebesar 4,32 N.cm dan nilai torsi statis minimum didapatkan pada $\alpha = 80^\circ$ yaitu sebesar 0,55 N.cm. Sedangkan pada $Re = 9 \times 10^4$, nilai torsi statis maksimum didapatkan pada $\alpha = 155^\circ$ yaitu sebesar 11,87 N.cm dan nilai torsi statis minimum didapatkan pada $\alpha = 85^\circ$ yaitu sebesar 0,93 N.cm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut bukaan sudu optimum pada $\alpha = 155^\circ$. Hal ini diduga karena disaat $\alpha = 155^\circ$ terjadi pengarahannya angin yang tepat pada *advancing blade* dengan pemberian plat pengganggu pada sudut $\theta = 15^\circ$.

4.3.4 Coefficient of Power (CoP) sebagai Fungsi Sudut Plat Pengganggu (θ)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa Coefficient of Power turbin Savonius (CoP) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan

Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran daya *output* dari turbin angin Savonius didapatkan dari perkalian antara kecepatan angular dan torsi dinamis yang diukur pada *rope brake dynamometer*. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

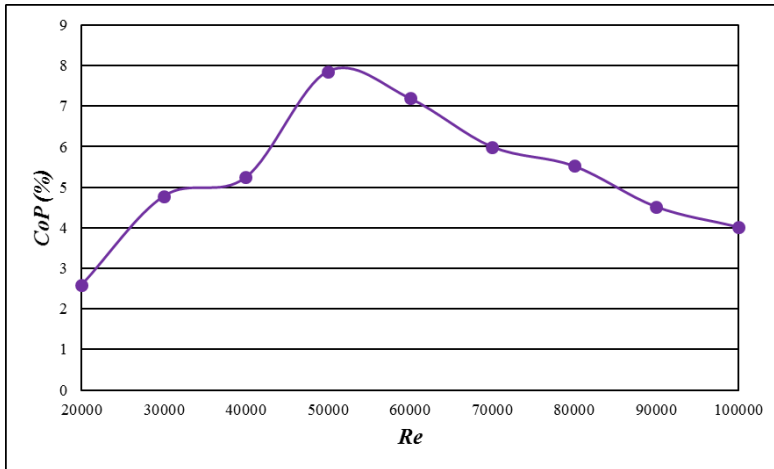
Berdasarkan pada gambar 4.12 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin Savonius pada tiap bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu. Setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat hingga mencapai harga optimum yang kemudian berangsur mengalami penurunan.

Pada gambar 4.12 terlihat bahwa *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 15° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin Savonius sebesar 3,7% pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 4,78% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 3,63% pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin Savonius sebesar 5,78% pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 7,19% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 5,32% pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin Savonius sebesar 3,52% pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 4,52% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 3,42% pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 15° terjadi kenaikan *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin Savonius. Hal ini diduga karena posisi sudut penempatan plat datar pengganggu yang menghalangi *returning blade* menyebabkan terjadinya fenomena penurunan gaya *drag* pada *returning blade*, di sisi lain arah plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih terarah sehingga selisih torsi dari kedua sudu meningkat dan terjadi kenaikan *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin Savonius. Sedangkan pada sudut

penempatan plat datar pengganggu dari posisi 15° hingga 90° terjadi penurunan *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin Savonius dikarenakan bukaan sudut plat datar pengganggu yang semakin besar menyebabkan aliran yang menuju ke bagian *advancing blade* akan kurang terarah pada pusat kerja sudu. Selain itu pada posisi 15° hingga 90° terjadi peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi bukaan sudut plat pengganggu yang mulai tidak menghalangi bagian *returning blade*, sehingga aliran fluida dapat menabrak sudu tersebut. Hal itu menyebabkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil sehingga selisih torsi antara kedua buah sudu tersebut akan semakin kecil pula.

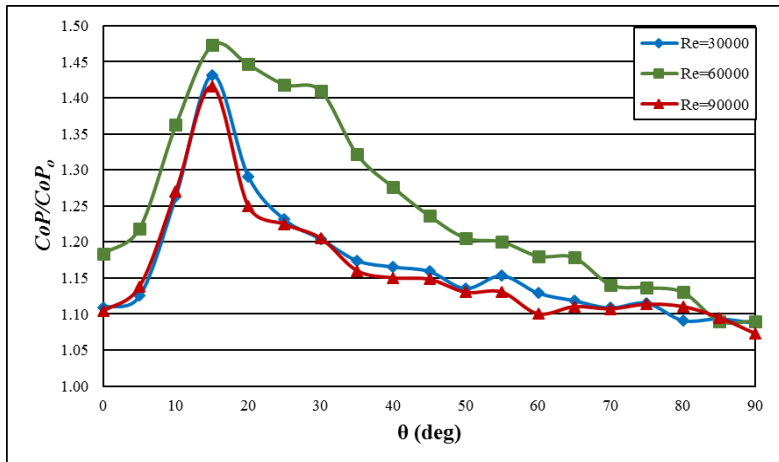
Fenomena lain yang terjadi adalah nilai *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin pada bilangan Reynolds 6×10^4 memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan bilangan Reynolds 3×10^4 dan 9×10^4 . Hal ini terjadi karena pada Reynolds Number 6×10^4 dapat menghasilkan kenaikan daya yang lebih besar dibandingkan Reynolds Number yang lainnya. Berikut merupakan gambar 4.13 yang menjelaskan mengenai letak nilai optimum *CoP* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari rentang Reynolds Number 2×10^4 sampai 1×10^5 , dengan kenaikan setiap bilangan Reynolds 1×10^4 pada sudut bukaan plat pengganggu sebesar 15° .



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi bilangan Reynolds (*Re*)

Pada penelitian kali ini digunakan variasi bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Sedangkan pada gambar 4.13, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) akan cenderung naik dari bilangan Reynolds 2×10^4 hingga bilangan Reynolds optimum terjadi pada $Re = 5 \times 10^4$ yang menghasilkan *CoP* maksimum sebesar 7,86%. Setelah itu untuk $Re > 5 \times 10^4$ nilai *CoP* cenderung mengalami penurunan. Dalam hal ini nilai bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai nilai maksimum di $Re = 6 \times 10^4$.

Dari data sebelumnya pada turbin Savonius yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*) maksimal sebesar 4,78%, 7,19%, dan 4,52%. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin Savonius yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut.



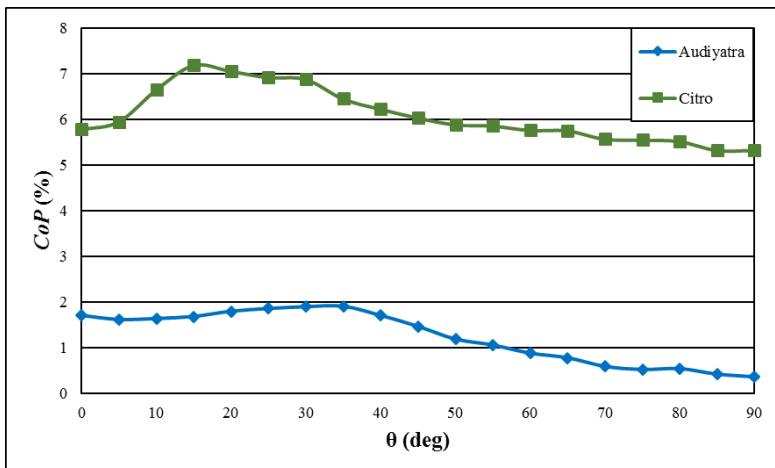
Gambar 4.14 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa perbandingan *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 5° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 15° hingga 90° . Pada bilangan Reynolds 3×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,11 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,43 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,09 kali lipat pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan Reynolds 6×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,18 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,47 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan

perbandingan sebesar 1,09 kali lipat pada sudut 90° . Pada bilangan Reynolds 9×10^4 , *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP/CoP_o) awal dari turbin Savonius sebesar 1,1 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 15° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 1,42 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,07 kali lipat pada sudut 90° .

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan Reynolds dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) memiliki nilai $CoP/CoP_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius dapat meningkatkan performa dari turbin Savonius.

Perbandingan grafik *Coefficient of Power* terhadap sudut bukaan plat datar pengganggu antara hasil eksperimen pada penelitian kali ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Audiyatra, dapat dilihat pada gambar 4.15. Grafik dihasilkan dari data pada pengoperasian bilangan Reynolds sebesar 6×10^4 .



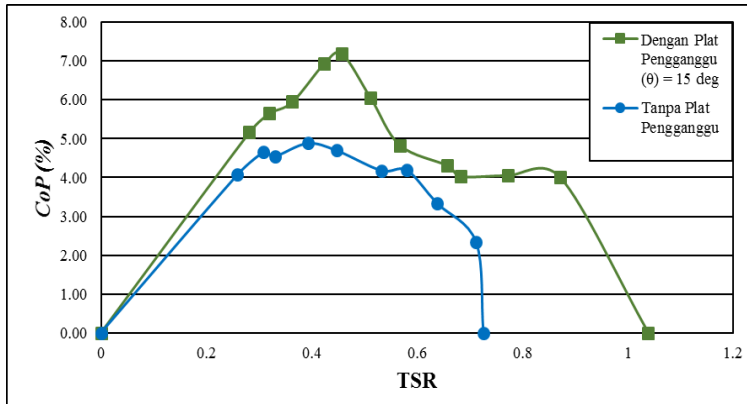
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* sebagai fungsi sudut plat pengganggu

Pada gambar 4.15 terlihat bahwa *Coefficient of Power (CoP)* dengan spesifikasi turbin Savonius pada penelitian kali ini mempunyai nilai maksimum sebesar 7,19% pada sudut plat datar 15°. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Audiyatra, *CoP* maksimum terjadi pada sudut plat datar 35° sebesar 1,9%. Perbedaan hasil penelitian yang cukup signifikan dari kedua penelitian ini diakibatkan oleh spesifikasi turbin yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh penulis menggunakan turbin Savonius dengan diameter sudu dan tinggi turbin berturut – turut sebesar 101,6 mm dan 300 mm. Pada penelitian Audiyatra menggunakan turbin Savonius dengan diameter sudu 60 mm dan tinggi turbin sebesar 80 mm. Hasil nilai *CoP* maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan hasil penelitian Audiyatra diakibatkan oleh perbedaan dari metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai *CoP*. Dalam penelitian Audiyatra menggunakan rangkaian alat dalam pengukuran torsi dinamis dari turbin angin tipe *Savonius* yang akan dikonversikan menjadi daya *output* yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan rangkaian pembebanan lampu. Dari rangkaian alat tersebut diduga terjadi *losses*, sehingga nilai *CoP* yang didapatkan terlampau kecil.

4.3.5 *Coefficient of Power (CoP) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio (TSR)*

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa daya *output* turbin Savonius yang dikonversikan menjadi *Coefficient of Power (CoP)* dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 yang dibandingkan dengan besar dari *Tip Speed Ratio (TSR)*. Pengukuran daya *output* dari turbin angin Savonius didapatkan dari perkalian antara kecepatan angular dan torsi dinamis yang diukur pada *rope brake dynamometer*. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Adapun *Tip Speed Ratio (TSR)* adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan melalui pengukuran kecepatan putar dari turbin Savonius saat turbin

terhubung dengan sistem *brake dynamometer* yang dibandingkan dengan kecepatan aliran angin. Data hasil pengukuran pada turbin angin Savonius untuk bilangan Reynolds 6×10^4 pada sudut bukaan plat pengganggu (θ) = 15° dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut.



Gambar 4.16 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (*TSR*) pada $Re = 6 \times 10^4$

Pada gambar 4.16 terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) tiap *trendline* akan cenderung mengalami peningkatan hingga $TSR = 0,46$ yang kemudian cenderung turun hingga $TSR = 1,04$. Pada bilangan Reynolds 6×10^4 , *CoP* memiliki titik maksimum yaitu 7,19 % pada saat *TSR* sebesar 0,46. Jika dibandingkan dengan tanpa plat pengganggu, *Coefficient of Power* (*CoP*) dengan menggunakan plat pengganggu selalu memiliki nilai lebih tinggi. Adapun peningkatan *Coefficient of Power* (*CoP*) disebabkan oleh terjadinya kenaikan putaran dan torsi dari turbin Savonius yang menyebabkan daya *output* semakin meningkat, sedangkan daya *input* dari aliran angin akan tetap sama. Kenaikan putaran dan torsi dari turbin Savonius dipengaruhi oleh penurunan gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang disebabkan oleh plat datar pengganggu.

Sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu semakin besar, hal itu menyebabkan torsi yang dihasilkan semakin besar.

Dengan adanya plat pengganggu di depan *returning blade* dapat memperbaiki performa turbin Savonius. Hal ini dibuktikan dengan lebih besar nilai CoP turbin Savonius dengan plat pengganggu dibandingkan tanpa plat pengganggu. Penambahan plat pengganggu membuat *range* TSR melebar, dari (0 – 0,726) menjadi (0 – 1,038). Peningkatan *range* nilai TSR menunjukkan bahwa efisiensi kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada eksperimen penempatan plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,035$ di depan *returning blade* turbin Savonius pada variasi sudut ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) untuk variasi bilangan Reynolds 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius berpengaruh dalam peningkatan performa turbin angin Savonius, hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin Savonius yang di teliti dibandingkan dengan turbin tanpa diberi pengganggu di depan *returning blade*.
2. Putaran maksimum dari turbin angin Savonius (n) diperoleh sebesar 823,5 *rpm* pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 1,43 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$.
3. Torsi statis maksimum dari turbin angin Savonius (T) diperoleh sebesar 9,29 *N.cm* pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis (T/T_o) didapatkan 2,85 kali lipat dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$.
4. *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius (CoP) diperoleh sebesar 7,19% pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$, sedangkan untuk perbandingan *Coefficient of Power* turbin (Cop/Cop_o) didapatkan 1,47 kali lipat dibandingkan dengan

turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$.

5. Untuk *design* dan ukuran turbin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini, tampak bahwa pengoperasian pada bilangan Reynolds 6×10^4 mempunyai peningkatan performa turbin yang paling tinggi dibandingkan dengan bilangan Reynolds 3×10^4 dan bilangan Reynolds 9×10^4 dengan sudut plat datar pengganggu $\theta = 15^\circ$.

5.2 Saran

Adapun saran perihal eksperimen yang telah dilakukan ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukannya penelitian numerik untuk meneliti karakteristik pola aliran ketika melewati plat datar pengganggu dan ketika melewati turbin angin Savonius dengan *properties* turbin yang bergerak.
2. Pengukuran torsi dinamis sebaiknya menggunakan alat ukur digital seperti digital torsimeter atau *torque sensor* agar lebih akurat dalam pengukuran.
3. Menggunakan ukuran turbin yang lebih besar agar faktor kesalahan pengukuran dapat diperkecil dan untuk mendapatkan performa turbin yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Shemmeri, T. 2010. **Wind Turbines : First Edition**. ISBN 978-87-7681-692-6
- [2] Altan, B. D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A., June 2008. "An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining". **Experimental Thermal and Fluid Science** 32, pp.1673–1678.
- [3] Daryanto, Y., 2007. **Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu**. Balai PPTAGG - UPT-LAGG.
- [4] KESDM. 2005. **Rasio Cadangan Dibanding Produksi Minyak Bumi di Indonesia dalam Kurun Waktu 18 Tahun**. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [5] Martosaputro, Soeripno, and Murti, Nila. 2013. "Blowing the Wind Energy in Indonesia". **Science Direct**, pp. 276-278.
- [6] Mahmoud, N. H., El-Haroun, A., Wahba, E., dan Nasef, M.H. 2010. "An Experimental Study On Improvement Of Savonius Rotor Performance". **Alexandria Engineering Journal**, pp. 20-22.
- [7] Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., and Thevenin, D., 2010. "Optimization of Savonius Turbines Using An Obstacle Shielding The Returning Blade". **Renewable Energy** 35, pp. 2618-2626.
- [8] Óskarsdóttir, Margrét Ósk. 2014. "A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines. Faculty of Industrial Engineering". **Mechanical Engineering and Computer**, pp. 51-53.

- [9] Pritchard, Philip J., dan Leylegian, John C., 2011. **Fox and McDonald's Introduction to fluid Mechanics**, Edisi 8. John Wiley and Sons, Inc.
- [10] Riswantarbi, Audiyatra Aji. 2016. **Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Plat Pengganggu di Depan Returning Blade Turbin Angin Savonius Terhadap Performa Turbin**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [11] Ross, Ian J. 2010. **Wind Tunnel Blockage Corrections: An Application to Vertical-Axis Wind Turbines**. University of Dayton.
- [12] Spera, David. 2008. **Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering**. Amer Society of Mechanical.
- [13] Turbinesinfo. 2017. **Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT**, <URL: <http://www.turbinesinfo.com/horizontal-axis-wind-turbines-hawt/>>.

LAMPIRAN

Tabel A1. Data Standar Turbin Angin Savonius

<i>Re</i> ($\times 10^4$)	<i>T_o</i> (Ncm)	<i>n_o</i> (<i>rpm</i>)	<i>Cop_o</i> (%)
3,0	0,44	210	3,34
6,0	1,22	361,45	4,88
9,0	3,26	610	3,19

Tabel A2. Data putaran turbin angin Savonius

θ	n			n/n_o		
	<i>Re=3x10⁴</i>	<i>Re=6x10⁴</i>	<i>Re=9x10⁴</i>	<i>Re=3x10⁴</i>	<i>Re=6x10⁴</i>	<i>Re=9x10⁴</i>
0°	245.70	445.73	701.50	1.17	1.23	1.15
5°	254.10	456.04	713.70	1.21	1.26	1.17
10°	273.00	498.80	786.90	1.30	1.38	1.29
15°	286.36	517.15	823.50	1.36	1.43	1.35
20°	276.25	496.47	805.20	1.32	1.37	1.32
25°	271.63	491.57	780.80	1.29	1.36	1.28
30°	265.31	473.68	762.50	1.26	1.31	1.25
35°	260.44	469.68	750.30	1.24	1.30	1.23
40°	261.13	461.47	743.67	1.24	1.28	1.22
45°	255.56	454.36	732.24	1.22	1.26	1.20
50°	251.52	442.53	724.22	1.20	1.22	1.19
55°	247.34	439.37	719.80	1.18	1.22	1.18
60°	247.12	433.74	712.44	1.18	1.20	1.17
65°	239.40	433.05	701.50	1.14	1.20	1.15
70°	235.20	419.28	695.40	1.12	1.16	1.14
75°	234.69	412.05	689.45	1.12	1.14	1.13
80°	233.10	408.44	683.20	1.11	1.13	1.12
85°	231.00	401.21	677.10	1.10	1.11	1.11
90°	231.00	397.60	671.25	1.10	1.10	1.10

Tabel A3. Data torsi statis turbin angin Savonius

θ	T			T/T ₀		
	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$
0°	0.88	2.55	8.48	2.00	2.09	2.60
5°	0.91	2.72	8.77	2.08	2.23	2.69
10°	0.98	3.10	9.03	2.24	2.54	2.77
15°	1.02	3.16	9.29	2.31	2.59	2.85
20°	0.92	2.91	8.90	2.10	2.39	2.73
25°	0.89	2.85	8.34	2.03	2.34	2.56
30°	0.89	2.71	8.22	2.03	2.22	2.52
35°	0.88	2.63	8.22	2.00	2.15	2.52
40°	0.87	2.62	8.05	1.99	2.15	2.47
45°	0.85	2.53	7.95	1.94	2.07	2.44
50°	0.85	2.47	7.50	1.93	2.02	2.30
55°	0.84	2.39	7.07	1.91	1.96	2.17
60°	0.81	2.39	6.94	1.84	1.96	2.13
65°	0.82	2.37	6.36	1.86	1.94	1.95
70°	0.81	2.23	6.03	1.85	1.83	1.85
75°	0.76	2.10	5.74	1.73	1.72	1.76
80°	0.71	2.01	5.48	1.62	1.65	1.68
85°	0.68	1.87	5.09	1.55	1.53	1.56
90°	0.62	1.73	4.69	1.41	1.42	1.44

Tabel A4. Data *Coefficient of Power* turbin angin Savonius

θ	CoP			CoP/CoP _o		
	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$
0°	3.70	5.78	3.52	1.11	1.18	1.10
5°	3.76	5.95	3.63	1.13	1.22	1.14
10°	4.22	6.65	4.05	1.26	1.36	1.27
15°	4.78	7.19	4.52	1.43	1.47	1.42
20°	4.31	7.06	3.99	1.29	1.45	1.25
25°	4.11	6.92	3.91	1.23	1.42	1.22
30°	4.02	6.88	3.84	1.20	1.41	1.21
35°	3.92	6.45	3.70	1.17	1.32	1.16
40°	3.89	6.23	3.67	1.17	1.28	1.15
45°	3.87	6.03	3.66	1.16	1.24	1.15
50°	3.79	5.88	3.60	1.14	1.21	1.13
55°	3.85	5.86	3.61	1.15	1.20	1.13
60°	3.77	5.76	3.51	1.13	1.18	1.10
65°	3.74	5.75	3.54	1.12	1.18	1.11
70°	3.70	5.56	3.53	1.11	1.14	1.11
75°	3.72	5.55	3.55	1.12	1.14	1.11
80°	3.64	5.51	3.54	1.09	1.13	1.11
85°	3.65	5.32	3.49	1.09	1.09	1.10
90°	3.63	5.32	3.42	1.09	1.09	1.07

Tabel A5. Data Torsi Statis Terhadap Bukaannya Sudut Sudu Turbin

α	Torsi statis tanpa plat			Torsi statis $\theta = 15^\circ$		
	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$	$Re=3 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$
0°	0.44	1.22	3.26	0.99	3.06	8.93
5°	0.4	0.84	3.06	0.88	2.65	8.54
10°	0.2	0.46	2.84	0.76	2.23	8
15°	-0.08	0.26	1.94	0.76	2	7.42
20°	-0.18	0.12	1.44	0.74	1.85	6.76
25°	-0.18	-0.12	1.08	0.65	1.59	6.37
30°	-0.24	-0.22	0.74	0.63	1.45	5.64
35°	-0.26	-0.34	0.14	0.5	1.48	4.86
40°	-0.3	-0.46	-0.64	0.54	1.42	3.98
45°	-0.38	-0.68	-1.42	0.53	1.41	3.74
50°	-0.42	-0.82	-1.26	0.47	1.12	3.75
55°	-0.32	-0.48	0.54	0.44	0.92	3.28
60°	-0.22	-0.06	1.38	0.39	0.89	3.05
65°	0.06	0.18	2.4	0.36	0.82	2.42
70°	0.24	0.46	2.4	0.26	0.65	1.59
75°	0.26	0.74	3.48	0.31	0.8	1.38
80°	0.36	0.94	4.26	0.23	0.55	1.04
85°	0.52	1.24	5.1	0.25	0.67	0.93
90°	0.74	1.64	6.24	0.23	0.66	1.34

95°	0.74	1.82	6.62	0.4	1.02	2.27
100°	0.82	1.98	7.18	0.48	1.12	4.54
105°	0.84	2.18	7.82	0.53	1.3	5.84
110°	0.88	2.28	8.06	0.64	2.01	7.82
115°	0.94	2.4	8.34	0.8	2.23	9.15
120°	1.04	2.54	8.74	1.04	2.67	9.42
125°	1.06	2.58	8.88	1.22	2.82	9.88
130°	1.08	2.66	9.02	1.29	2.86	9.96
135°	1.12	2.68	9.24	1.33	3.02	10.64
140°	1.18	2.8	9.32	1.32	3.17	10.94
145°	1.24	2.62	8.66	1.36	3.29	11.12
150°	1.28	2.44	8.28	1.31	3.75	11.76
155°	1.04	2.16	7.16	1.4	4.32	11.87
160°	0.98	1.78	6.48	1.38	4.15	11.48
165°	0.72	1.66	5.8	1.26	3.61	10.54
170°	0.58	1.52	5.22	1.14	3.29	9.68
175°	0.5	1.34	4.44	1.04	3.08	8.95
180°	0.48	1.28	4.02	1.03	3.01	8.58

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Malang pada 3 Juli 1994. Merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis berasal dari Desa Ngajum Rt 04 Rw 11 Kec. Ngajum Kab. Malang, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Arbiyatul Athfaliyah Ngajum, SDN 05 Ngajum, SMPN 01 Ngajum, dan SMAN 1 Kepanjen. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur

SBMPTN Tulis (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada pilihan pertama. Penulis terdaftar dengan Nomor Pokok Mahasiswa/NRP 2113 100 158.

Selama masa perkuliahan, penulis tercatat mengambil bidang studi Konversi Energi sebagai bahasan Tugas Akhir. Di jurusan Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam bidang kemahasiswaan yaitu sebagai pengurus Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Pada periode 2014/2015 menjabat sebagai Staff Divisi Umum, periode 2015/2016 menjabat sebagai Staff Ahli Divisi Umum, dan pada periode tersebut diamanahi menjadi Ketua Acara *Mechanic's Skill Competition* 2016. Penulis juga tercatat sebagai koordinator asisten praktikum Pompa (*Turbo Machinery*) di laboratorium mekanika fluida. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat ariyanto.citro@gmail.com

